

Taina Siponen, Pekka Taimisto, Tarja Yli-Tuomi ja Raimo O. Salonen

Kuopion katupölytutkimus 2019

Hankkeen loppuraportti

Katupöly on vuodesta toiseen erityisesti keväällä esiintyvä ongelma, joka syntyy, kun talven aikana renkaiden alla jauhautunut tien asfalttipinnan materiaali ja hiekoitushiekka nousevat lyhyessä ajassa kaupunki-ilmaan teiden pintojen kuivuttua lumen ja jään sulamisen jälkeen. Katupölystä aiheutuu ympäristö- ja viihtyvyshaittojen lisäksi myös terveyshaittoja, kun erityisesti vilkkaiden teiden ja katujen varsilla liikkujat altistuvat ympäröivässä ilmassa olevalle pölylle. Terveyshaitoille alttiimpia ovat pienet lapset, allergikot ja astmaa sairastavat. Uusimmat tutkimustulokset osoittavat haittoja myös kroonisia sydän- ja verisuonitauteja sairastavilla.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin kävelijän altistumista Kuopion keskustassa ja sen läheisyydessä olevilla kevyenliikenteen väylillä. Kävelijän altistumista mitattiin kevään katupölykauden aikana maalís-huhtikuussa 2019, sitä seuranneen runsaan puhdistavan sadejakson jälkeen toukokuussa 2019 ja siitepölykauden jälkeen syyskuussa 2019. Kävelijän altistumispitoisuuksia verrattiin myös kaupungin kiinteiden mittausasemien tuloksiin.

Kävelijän keskimääräinen altistuminen sekä pienhiukkasille että hengitettävälle hiukkasille oli selvästi suurempaa kuin pitoisuuskeskiarvot mittausasemilla. Tien pinnan ollessa märkä hiukkaspitoisuudet olivat huomattavasti pienempiä kuin kuivalla kelillä. Tien pinnan kosteudella ei ollut vastaavaa vaikutusta pääosin pakokaasupäästöistä peräisin olevien hiukkasten lukumäärän ja mustahiilen pitoisuuksiin.

Tulevaisuudessa on tärkeää tutkia lähemmin eri liikennetekijöiden kvantitatiivista vaikutusta ilmanlaatuun ja liikenneväylien lähellä kävelevien ja pyöräilevien ihmisten henkilökohtaiseen altistumiseen. Näitä tietoja voitaisiin hyödyntää kaupunkirakenteen ja liikenteen suunnittelussa. Myös katupölyn mahdollinen tunkeutuminen alakerroksissa olevien asuntojen sisäilmaan olisi syytä tutkia, jotta kokonaisaltistumisesta ja sen aiheuttamista terveysvaikutuksista saataisiin tarkempaa tietoa.



Esipuhe

Katupöly on kaupunkialueilla jokakeväinen puheenaihe, vaikka katujen puhdistamista on tehostettu. Toisaalta ilmastonmuutoksen myötä sääolosuhteet ovat muuttuneet liukkauden torjunnan ja katujen puhdistamisen osalta vaativammiksi. Katujen kuivuessa liikenteen ja tuulen kadulta ilmaan nostama pöly on viihtyvyyshaitta, mutta siitä aiheutuu lisäksi myös terveyshaittoja, joille alttiimpia ovat pienet lapset, allergikot ja astmaa sairastavat. Uusimmat tutkimustulokset osoittavat haittoja myös kroonisia sydän- ja verisuonitauteja sairastavilla.

Kuopion katupölytutkimuksessa 2019 Terveiden ja hyvinvoinnin laitoksen ympäristöepidemiologian yksikkö mittasi kävelijän altistumista katupölylle Kuopion keskustassa ja sen läheisyydessä olevilla kevyenliikenteen väylillä. Tässä julkaisussa raportoidaan kevään katupölykauden aikana maalisi–huhtikuussa 2019, sitä seuranneen runsaan puhdistavan sadejakson jälkeen toukokuussa 2019 ja siitepölykauden jälkeen syyskuussa 2019 tehtyjen mittausten tulokset. Kävelijän altistumisriskitoisuuksia verrattiin myös kaupungin kiinteiden mittausasemien tuloksiin.

Tutkimusta ovat rahoittaneet Kuopion kaupungin ympäristönsuojelu- ja ympäristöterveyspalvelut sekä Terveiden ja hyvinvoinnin laitos. Kiitämme projektin ohjausryhmää taustatiedoista sekä hyvästä yhteistyöstä. Kiitämme ympäristönsuojelutarkastaja Erkki Pärjälää Kuopion kaupungin mittausaineistojen käsittelystä ja osallistumisesta projektin ensimmäisten tulosten julkaisemiseen Ympäristö ja Terveys-lehdessä.

Tiivistelmä

Taina Siponen, Pekka Taimisto, Tarja Yli-Tuomi ja Raimo O. Salonen. Kuopion katupölytutkimus 2019: hankkeen loppuraportti. Terveiden ja hyvinvoinnin laitos (THL). Työpaperi 11/2021. 31 sivua. Helsinki 2021. ISBN 978-952-343-641-1 (verkkojulkaisu)

Katupöly on vuodesta toiseen erityisesti keväällä esiintyvä ongelma, joka syntyy, kun talven aikana renkaiden alla jauhautunut tien asfalttipinnan materiaali ja hiekoitushiekka nousevat lyhyessä ajassa kaupunkilmaan teiden pintojen kuivuttua lumen ja jään sulamisen jälkeen. Katupöly on suurimmaksi osaksi karkeita hengitettäviä hiukkasia ($PM_{10-2.5}$; hiukkasten halkaisija 2,5-10 mikrometriä), mutta siinä on myös pieni osa pienhiukkasia ($PM_{2.5}$; hiukkasten halkaisija alle 2,5 mikrometriä). Liikennemäärän, raskaiden ajoneuvojen osuuden ja ajonopeuden on kokemuseräisesti havaittu vaikuttavan merkittävästi ilmaan nousevan pölyn määrään tuulen ja sateen lisäksi. Liikenteen ominaisuuksien ja katujen puhdistuksen eri vaiheiden osuutta pölyämisessä ja kävelijöiden altistumisesta ei kuitenkaan ole systemaattisesti tutkittu samanaikaisissa mittausjärjestelyissä, joissa säätila olisi mahdollisimman samanlainen valituissa erilaisissa liikenneympäristöissä. Katupölystä aiheutuu ympäristö- ja viihtyvyshaittojen lisäksi myös terveyshaittoja, kun erityisesti vilkkaiden teiden ja katujen varsilla liikkujat altistuvat ympäröivässä ilmassa olevalle pölylle. Terveyshaittoille alttiimpia ovat pienet lapset, allergikot ja astmaa sairastavat. Uusimmat tutkimustulokset osoittavat haittoja myös kroonisia sydän- ja verisuonitauteja sairastavilla.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin kävelijän altistumista Kuopion keskustassa ja sen läheisyydessä olevilla kevyenliikenteen väylillä. Kävelijän altistumista mitattiin kevään katupölykauden aikana maaliskuuhuhtikuussa 2019, sitä seuranneen runsaan puhdistavan sadejakson jälkeen toukokuussa 2019 ja siitepölykauden jälkeen syyskuussa 2019. Kävelijän altistuspitoisuuksia verrattiin myös kaupungin kiinteiden mittausasemien tuloksiin. Lisäksi ruutukaavakeskustan pitoisuustasoa tarkasteltiin myös välittömästi keskustaluokalla suoritettua keskitettyä hiekanpoistoa jälkeen huhtikuussa 2019. Nämä tulokset on raportoitu Ympäristö ja Terveys-lehdessä syksyllä 2019.

Kävelijän keskimääräinen $PM_{2.5}$ -altistuminen oli selvästi suurempaa kuin pitoisuuskeskiarvot mittausasemilla. Ero oli samansuuntainen, mutta jonkin verran pienempi suuremman kokoluokan PM_{10} -pitoisuudessa. Altistuminen oli selvästi pienempää silloin, kun tien pinta oli märkä, jolloin pöly ei noussut katujen pinnalta ympäröivään ilmaan. Sen sijaan tien pinnan ollessa puolikuiva, ilmassa leijuvien hiukkasten pitoisuudet vastasivat välillä märän pinnan tasoa ja toisinaan kuivan pinnan tasoa. Tien pinnan kosteudella ei ollut vastaavaa vaikutusta pääosin pakokaasupäästöistä peräisin olevien hiukkasten lukumäärän ja mustahiilen pitoisuuksiin.

Tulevaisuudessa on tärkeää tutkia lähemmin eri liikennetekijöiden (kevyen ja raskaan autoliikenteen määrä ja ajonopeus, ajoväylän etäisyys kävely- ja pyörätiestä) kvantitatiivista vaikutusta ilmanlaatuun ja liikenneväylien lähellä kävelevien ja pyöräilevien ihmisten henkilökohtaiseen altistumiseen. Näitä tietoja voitaisiin hyödyntää kaupunkirakenteen ja -liikenteen suunnittelussa. Myös katupölyn mahdollinen tunkeutuminen alakerroksissa olevien asuntojen sisäilmaan olisi syytä tutkia.

Avainsanat: katupöly, kevätöly, altistuminen, kävelijä

Sammandrag

Taina Siponen, Pekka Taimisto, Tarja Yli-Tuomi ja Raimo O. Salonen. Kuopion katupölytutkimus 2019: hankkeen loppuraportti. [Kuopios undersökning om gatudamm 2019: projektets slutrapport]. Institutet för hälsa och välfärd (THL). Diskussionsunderlag 11/2021. 31 sidor. Helsingfors, Finland 2021. ISBN 978-952-343-641-1 (nätpublikation)

Gatudamm är ett problem som förekommer år efter år, i synnerhet på våren. Problemet uppstår då material från vägens asfaltyta som finfördelats under däckens på vintern och sandningssand stiger upp i stadsluften på kort tid efter att vägytorna torkat upp då snön och isen smält. Gatudamm består till största delen av grova inandningsbara partiklar (PM10-2.5; partiklarnas diameter är 2,5–10 mikrometer), men det innehåller också en liten andel små partiklar (PM2.5; partiklarnas diameter är under 2,5 mikrometer). Det har evidensbaserat observerats att mängden trafik, andelen tunga fordon och körhastigheten utöver vind och regn har en betydande inverkan på mängden damm som stiger upp i luften. Man har dock inte systematiskt undersökt vilken roll trafikens egenskaper och de olika skedena i rengörandet av gatorna har i dammbildningen och fotgängarnas exponering i samtidiga mätarrangemang där väderleken är så likadan som möjligt i olika trafikmiljöer. Gatudamm orsakar förutom olägenheter för miljön och trivselen även olägenheter för hälsan, då i synnerhet personer som rör sig långsamt trafikerade vägar och gator exponeras för damm i den omgivande luften. Små barn, allergiker och astmatiker är mer utsatta för hälsorisker. De senaste undersökningsresultaten påvisar skador även hos personer med kroniska hjärt- och kärlsjukdomar.

I denna undersökning granskades fotgängarens exponering på gång- och cykellederna i centrum av Kuopio och i dess närhet. Fotgängarnas exponering mättes under vårens gatudammperiod i mars–april 2019, efter den rikliga, renande nederbördsperioden som följde efter den i maj 2019 och efter pollensäsongen i september 2019. Exponeringshalterna för fotgängare jämfördes också med resultaten från stadens fasta mätstationer. Dessutom granskades halterna i rutplanscentrumet också genast efter det centraliserade avlägsnandet av sand i centrumområdet i april 2019. Dessa resultat rapporterades i tidningen om miljö och hälsa Ympäristö ja terveys hösten 2019.

Fotgängarnas genomsnittliga PM2.5-exponering var klart högre än de genomsnittliga halterna vid mätstationerna. Skillnaden gick i samma riktning, men var något mindre halterna i den större storleksklassen PM10. Exponeringen var betydligt mindre när vägytan var våt och dammet inte steg upp från gatans yta till den omgivande luften. När vägytan var halvtorr motsvarade halterna av partiklar som svävade i luften däremot ibland nivån för våta ytor och ibland nivån för torra ytor. Vägytans fuktighet hade inte motsvarande inverkan på antalet partiklar som huvudsakligen härstammar från avgasutsläpp och på halterna av svart kol.

I framtiden är det viktigt att närmare undersöka den kvantitativa effekten av olika trafikfaktorer (mängden och körhastigheten för lätt och tung biltrafik, körledens avstånd från gång- och cykelvägen) på luftkvaliteten och den individuella exponeringen bland personer som går och cyklar nära trafiklederna. Denna information kan utnyttjas vid planeringen av stadsstrukturen och stadstrafiken. Det är också skäl att undersöka om gatudamm eventuellt tränger in i inomhusluften i bostäder på de nedre våningarna.

Nyckelord: gatudamm, vårdamm, exponering, fotgängare

Abstract

Taina Siponen, Pekka Taimisto, Tarja Yli-Tuomi ja Raimo O. Salonen. Kuopion katupölytutkimus 2019: hankkeen loppuraportti. [Kuopio street dust study 2019: final report of the project]. Finnish Institute for Health and Welfare (THL). Discussion Paper 11/2021. 31 pages. Helsinki, Finland 2021. ISBN 978-952-343-641-1 (online publication)

Year after year street dust is a problem that materializes especially in the spring. A significant portion of the particulate matter on streets comes from asphalt and ground grit pulverised under the tyres of cars. When road surfaces dry up after the snow and ice have melted in the spring, street dust generated and accumulated during the winter is risen into the air by traffic flow and wind. Street dust mostly comprises coarse particles ($PM_{10-2.5}$; particle diameter 2.5-10 micrometres) that are inhalable, but a small portion falls within the fine particle size range ($PM_{2.5}$; particle diameter less than 2.5 micrometres). Empirical observations have shown that, in addition to wind and the rain, the traffic intensity, the portion of heavy-duty vehicles, and driving speeds significantly affect the amount of dust lifted into the air. However, the effects of traffic characteristics and the different phases of street cleaning on dust concentration and pedestrians' exposure to it have not been studied systematically using simultaneous measurement arrangements in weather conditions that would be as similar as possible in the various traffic environments that are selected. In addition to harm to the environment and to human comfort, street dust damages health especially when people are exposed to high PM_{10} concentrations near busy streets and roads. Young children, people with allergies and asthma sufferers are the most vulnerable to health hazards. Results from the latest research also indicate harm to sufferers of chronic cardiovascular diseases.

This study examined the exposure of a pedestrian on pedestrian and bicycle paths in the centre of Kuopio and nearby areas. The exposure of the pedestrian was measured in the spring road dust season in March-April 2019, and after the period of heavy rain in May 2019, and in September 2019 after the pollen season. The pedestrian's exposure levels were also compared with results from fixed monitoring stations in the city. In addition, dust levels in the grid plan area of the city centre were examined immediately after a concentrated effort to remove sand from the centre area in April 2019. These results were reported in the journal *Ympäristö ja Terveys* in the autumn of 2019.

The pedestrian's average $PM_{2.5}$ exposure clearly exceeded the average concentrations at the measurement stations. The difference was similar, but somewhat lower with the larger-sized PM_{10} particles. The exposure was clearly lower when the surface of the road was wet preventing the dust to rise from the surface of the roads to the surrounding air. However, when the road surface was semi-dry the airborne particle concentration was sometimes equivalent to that of the levels when the surface was wet, and sometimes to the levels when it was dry. The dampness of the road surface did not have an equivalent effect on the particle number concentrations or black carbon concentrations from exhaust gases.

In the future more detailed research will be needed on the quantitative effects of different factors in traffic (the amount of light- and heavy-duty traffic and driving speed, the distance from the traffic lane to the pedestrian, or cycling path) on air quality and the personal exposure of pedestrians and cyclists near the traffic lanes. This information could be utilised in the planning of urban structure and transport. The possible infiltration of street dust into the indoor air of dwellings on the lower floors of buildings also needs study.

Keywords: street dust, spring dust, exposure, pedestrian

Sisällys

1 Johdanto	7
2 Aineisto ja menetelmät.....	8
2.1 Tutkimusasetelma.....	8
2.2 Henkilökohtaisen altistumisen mittauksissa käytetyt laitteet ja suodatinnäytteet	8
2.3 Kävelyreitit läheisyydessä sijaitsevat kiinteät mittausasemat	9
2.4 Ajoneuvojen liikennemäärät kävelyreittien varrella.....	10
2.5 Mittaustulosten käsittely	10
3 Tulokset ja pohdinta	12
3.1 Kävelijän henkilökohtaisten altistumismittausten keskimääräiset pitoisuustasot	12
3.2 Kävelijän reittikohtaisten altistumismittausten pitoisuustasojen vertailu mittausasemien pitoisuuksiin	15
3.3 Kaikkien reittien yhdistetyn pitoisuustason vertailu eri mittausasemien pitoisuuksiin	23
3.4 Keskitetyn hiekoitushiekan poiston vaikutus kävelijän altistumiseen ja kiinteän mittausaseman hiukkaspitoisuuksiin Kuopion ydinkeskustassa	25
4 Yhteenveto ja tulevaisuuden tutkimustarpeet.....	25
Kirjallisuus	26
Liitteet	27
Liite 1. Kartta mittausreiteistä ja Kuopion kaupungin ilmanlaadun mittausasemien sijainnista	27
Liite 2. Mittausreittien ja mittausasemien pitoisuustasojen väliset regressioyhtälöt.....	28
Liite 3. Kaikki reitit yhdistävä ympyräreitti verrattuna ilmanlaadun mittausasemien pitoisuuksiin	31

1 Johdanto

Kaupunkien liikenneympäristöissä on tehty useiden vuosikymmenten aikana runsaasti tutkimuksia, jotka ovat keskittyneet erityisesti pienhiukkasille ($PM_{2.5}$; hiukkasten halkaisija alle 2,5 mikrometriä) altistumisen ja altistumisesta aiheutuvien terveyshaittojen arvioimiseen. Pienhiukkaset liikenneympäristöissä ovat peräisin muun muassa ajoneuvojen pakokaasupäästöistä. Liikenteen tuottamien pakokaasupäästöjen on arvioitu vähenevän jo lähitulevaisuudessa ajoneuvojen kiristyneiden päästömääräysten ja Suomen vanhan autokannan uusiutumisen seurauksena (Suonheimo ym. 2015). Moottoripäästöjä koskevat määräykset eivät tule kuitenkaan vähentämään karkeiden hengitettävien hiukkasten ($PM_{10-2.5}$; hiukkasten halkaisija 2,5–10 mikrometriä) määrää, sillä tämän kokoluokan hiukkaset ovat liikenneympäristössä pääosin peräisin katupölystä. Ajoneuvojen sähköistyminen voi painavien akkujen vuoksi jopa lisätä katupölyn määrää, sillä katupölyä muodostuu niin ajoneuvojen osien kulumisesta kuin myös renkaiden kuluttaessa asfaltin pintaa ja jauhaessa hiekotushiekkaa sekä tien pinnalle kertynyttä orgaanista ainesta, kuten puiden lehtiä, pienemmäksi. Katupölypäästöt voivat lisääntyä myös, mikäli ajoneuvojen määrä edelleen kasvaa tulevaisuudessa.

Katupölyn vaikutusta paikalliseen ilmanlaatuun vilkkaasti liikennöityjen väylien läheisyydessä seurataan mittaamalla hengitettävien hiukkasten (PM_{10} ; hiukkasten halkaisija alle 10 mikrometriä) kokonaispitoisuutta. Mittausten tuloksia verrataan EU:n raja-arvopitoisuuteen, joka on sama kuin WHO:n matalan terveysriskin ohjearvopitoisuus. EU lainsäädäntö sallii tämän $50 \mu g/m^3$ vuorokausipitoisuuden ylityksiä 35 kpl vuodessa samalla mittausasemalla ilman hallinnollisia seuraamuksia.

Katupölyn aiheuttamat PM_{10} -pitoisuustasot ovat korkeimmillaan keväällä niin kutsutun katupölykauden aikana, jolloin talven aikana lumen ja jään alle kertynyt pöly nousee teiden kuivuttua ympäröivään ilmaan liikennevirtojen ja tuulen vaikutuksesta. Katupöly on suurimmaksi osaksi $PM_{10-2.5}$ -hiukkasia, jotka kulkeutuvat hengitysilman mukana ylähengitysteihin ja edelleen henkitorveen ja keuhkoputkiin. Vain pieni osa katupölystä, noin 10–20 prosenttia, on $PM_{2.5}$ -hiukkasia. $PM_{10-2.5}$ -hiukkasten terveyshaitoista on huomattavasti vähemmän tutkimustietoa kuin moottoriajoneuvojen pakokaasupäästöjen tuottamista $PM_{2.5}$ -hiukkasten haitoista, sillä vallalla oli pitkään käsitys, että altistuminen kooltaan suuremmille karkeille hengitettävälle $PM_{10-2.5}$ -hiukkasille aiheuttaa lähinnä ärsytysoireita. Vallinneesta käsityksestä huolimatta $PM_{10-2.5}$ -hiukkasten on kuitenkin raportoitu olevan yhteydessä muun muassa astman pahenemiseen ja lisääntyneisiin keuhkoputkentulehduksiin (Lanki 2013). Karkeiden hiukkasten terveysvaikutusten tutkimista on haitannut se, että pitoisuudet vaihtelevat paikallisesti enemmän kuin $PM_{2.5}$ -hiukkasten pitoisuudet. Tämän takia henkilökohtaisen altistumisen arvioiminen kiinteiden mittausasemien perusteella on epätarkempaa karkeiden kuin pienhiukkasten osalta.

Kuopion katupölyhankkeen tarkoituksena oli selvittää millaisille PM_{10} -, $PM_{2.5}$ -, mustahiili- (BC) eli no-kihiukkasten ja ultrapienien hiukkasten (PNC) pitoisuustasoille kävelijä altistuu liikenneväylien välittömässä läheisyydessä olevilla kevyenliikenteen väylillä katupölykaudella ja sen ulkopuolella. Lisäksi hankkeessa tutkittiin Kuopion keskusta-alueen keskitetyn hiekoitushiekan poiston ja katujen puhdistuksen vaikutusta keskustan mittausaseman ja kävelijän henkilökohtaisen altistumisen PM_{10} -pitoisuustasoihin. Hankkeessa selvitettiin myös, miten hyvin kävelyreittiä lähimpänä olevien ilmanlaadun mittausasemien PM_{10} - ja $PM_{2.5}$ -pitoisuudet kuvasivat kävelijän todellista altistumista.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Tutkimusasetelma

Mittaukset toteutettiin viidellä liikennemäärien, maksimijonopeuden ja rakennetun lähiympäristön suhteen toisistaan poikkeavalla osareitillä Kuopiossa. Osareittien pituudet vaihtelivat välillä 1,3–2,5 km ja niiden yhteenlaskettu pituus oli noin 9 km. Kartta mittausreiteistä on esitetty liitteessä 1. Mittauksia tehtiin ruuhka-aikojen ulkopuolella aamupäivällä klo 9–11 ja iltapäivällä klo 12:30–14:30. Mittaukset jaettiin kolmeen erilliseen mittausjaksoon: katupölykauden aikaiset mittaukset 28.3.–12.4.2019, runsaan sadejakson jälkeiset mittaukset 6.5.–8.5.2019 ja syysmittaukset 18.–20.9.2019. Mittauksia tehtiin lukumääräisesti eniten katupölykaudella, jolloin hengitettävien hiukkasten pitoisuusvaihtelun odotettiin olevan liikenneympäristöissä suurinta. Lisäksi mittauksia tehtiin myös välittömästi ruutukaavakeskustan keskitetyn hiekanpoiston jälkeen 15.4.–29.4.2019, mutta näiden osalta tulosten käsittely kohdistettiin Kuopion ydin-keskustan mittausreiteille.

Tutkija työnsi mittalaitteet sisältävää mittauskärryä ajoväylien läheisyydessä olleilla kevyen liikenteen väylillä keskimääräisellä kävelynopeudella 6 km/h. Mittaukset pyrittiin ajoittamaan poutapäiville, jolloin kadut olivat pääosin kuivia tai puolikuivia. Tutkijan arvio tienpinnan kuivuudesta sekä kevyenliikenteen väylällä että viereisellä ajoradalla kirjattiin kenttäpäiväkirjaan.

2.2 Henkilökohtaisen altistumisen mittauksissa käytetyt laitteet ja suodatinnäytteet

PM_{2.5}- ja PM₁₀-pitoisuustasojen mittaamisessa käytettiin Harvard-impaktoreja (Air Diagnostics and Engineering Inc., Naples, Maine, Yhdysvallat) liitettynä pDR-1200x-fotometreihin (MIE, Bedford, Massachusetts, Yhdysvallat) kokoluokittaisen jatkuvatoimisen hiukkaspitoisuuden määrittämiseksi. Lisäksi molemmille kokoluokille kerättiin päiväkohtainen hiukkasnäyte Millipore Fluoropore FSLW-suodattimelle (Millipore Corporation, Burlington, Massachusetts, Yhdysvallat) gravimetristä analyysiä varten. Laitteistoon liitetyt pumpput olivat malliltaan BGI PQ-100 (Mesalabs Inc., Butler, New Jersey, Yhdysvallat). Mustahiilipitoisuus määritettiin microAeth AE51-mikroetalometrillä (Aethlabs, San Francisco, Kalifornia, Yhdysvallat) ja hiukkasten lukumääräpitoisuus Oxility Nanotracer XP-laitteella (Oxility B.V., Best, Alankomaat).

Gravimetrinen analyysi tehtiin käyttäen Mettler Toledo XP6-ultramikrovaakaa (Columbus, Ohio, Yhdysvallat) sekä Ioncare Stat-Pen (Ion-Care AB, Vellinge, Ruotsi) varauksenpoistajaa. Henkilökohtaisen altistumisen mittauksissa käytettyjen jatkuvatoimisten laitteiden tallennusresoluutio oli yksi minuutti. Riittävän massapitoisuuden saamiseksi suodatinnäytteet kerättiin yhdistelmänäytteinä aamupäivän ja iltapäivän mittauksista. Mittalaitteet sijoitettiin työnnettävään mittauskärryyn (kuva 1), jossa näytteenottokorkeus oli noin metri maanpinnan tason yläpuolella.



Kuva 1. Tutkija työntämässä mittausvaunua, johon henkilökohtaisen altistumisen mittauksissa käytetty laitteisto oli sijoitettu.

2.3 Kävelyreitien läheisyydessä sijaitsevat kiinteät mittausasemat

Kuopion kaupungilla on useita ilmanlaadun mittausasemia, joista neljä sijaitsee keskustassa tai sen lähi-alueilla. Tutkimuksessa hyödynnetyt kaupungin mittausasemat ja mittalaitteet on esitetty taulukossa 1. Maaherrankadun mittausasema sijaitsee Kuopion keskustassa, pääkirjaston pysäköintialueella, pääkirjastorakennuksen vieressä. Näytteenottokorkeus on noin neljä metriä. Mittausasemasta 15 metrin päässä kulkevan Maaherrankadun liikennemäärä on 7000 ajoneuvoa/vrk ja 50 metrin päässä olevan Tulliportinkadun liikennemäärä on 5500 ajoneuvoa/vrk (Kuopion kaupunki 2018). Maaherrankadun mittausasema kuvaa pitoisuuksia liikennelyympäristössä.

Tasavallankatu mittausasema sijaitsee vilkkaasti liikennöidyssä ympäristössä, jossa liikennemäärä on reilut 21 000 ajoneuvoa/vrk. Tasavallankadulla liikkuu asiointi- ja läpiajoliikenteen lisäksi runsaasti raskasta liikennettä. Asema on Kuopion Energia Oy:n Haapaniemen voimalaitosten lähivaikutusalueella. Haapaniemen voimalaitoksessa poltetaan turvetta ja puuperäisiä polttoaineita. Myös läheisen rintamamiestaloalueen kiinteistökohtaiset lämmityspäästöt vaikuttavat jossakin määrin aseman pitoisuustasoihin. Aseman näytteenottokorkeus on noin 4 metriä maanpinnasta.

Savilahden mittausasema sijaitsee Kuopion yliopistollisen sairaalan tontilla vilkkaasti liikennöidyn Savilahdentien varrella. Savilahdentien liikennemäärä on noin 20 000 ajoneuvoa /vrk. Savilahden asema on alle 100 metrin päässä Kuopion kaupungin läpi kulkevasta moottoritiestä, jonka liikennemäärä on reilut 36 000 ajoneuvoa vuorokaudessa. Asema sijaitsee korkeammalla kuin viereinen Savilahdentie. Asema edustaa pitoisuuksia liikennelyympäristössä. Vajaan kilometrin päässä asemasta sijaitsee Niiralan lämpökeskus, jossa poltetaan kevyttä polttoöljyä ja joka on käytössä satunnaisesti kovilla pakkasilla ja kaukolämpöverkon häiriötilanteissa.

Niiralan asema sijaitsee tiiviisti rakennetulla rintamamiestalovaltaisella pientaloalueella. Niirala on noin 3800 asukkaan kaupunginosa, jonka pohjoisosassa on kerrostaloja ja eteläosassa omakotitaloja. Osa alueen pientaloista on kaukolämpöverkossa, mutta alueella on myös sähkö- ja öljylämmitteisiä taloja sekä runsaasti puun pienpoltoa. Kuopion Energia Oy:n Haapaniemen voimalaitos sijaitsee noin 1,5 kilometrin päässä ja Niiralan lämpölaite vajaan kilometrin päässä mittausasemasta.

Taulukko 1. Tutkimuksessa mukana olleet Kuopion kaupungin ylläpitämät ilmanlaadun mitta-usasemat: mittauspaiikat, mitattavat suureet ja mittalaitteet. Mittausasemilla ilmanäytteet ote-taan aseman katolta noin 4 m korkeudelta maanpinnasta.

Mittauspaikka	Mitattava suure	Laitte
Tasavallankadun mittausasema	PM _{2,5} PM ₁₀	TEOM1400a MP101
Maaherrankadun mittausasema	PM _{2,5} PM ₁₀	TEOM1400a Osiris
Savilahden mittausasema	PM _{1-2,5-4-10}	Fidas 200
Niiralan mittausasema	PM _{2,5} PM ₁₀	TEOM1405 TEOM1400a

2.4 Ajoneuvojen liikennemäärät kävelyreittien varrella

Reitti 1 kulki moottoritien alitse. Moottoritien itäpuolella kulkeneen osuuden liikennemäärä on Leväsentiel-lä arki vuorokausina keskimäärin 17 800 ajoneuvoa, mutta välittömästi moottoritien länsipuolella reitti kulki vähän liikennöidyn kadun vieressä. Liikennemäärä moottoritiellä Leväsentien kohdalla on keskimäärin 38 500 ajoneuvoa/vrk (Väylävirasto 2019). Reitti 2 kulki vilkkaasti liikennöidyn Tasavallankadun varrella. Tasavallankadulla ajoneuvojen liikennemäärä ylittää 20 000 ajoneuvon määrän vuorokaudessa moottoritien puoleisessa päässä. Ajoneuvojen määrä on kuitenkin selvästi pienempi reitin 2 kaupungin puoleisessa pääs-sä vähentyen lähes puoleen, kun lähestytään ruutukaavakeskustaa. Reitiltä 3, ruutukaavakeskustan alueella, ei ole saatavilla kattavia liikennemäärätietoja koko reitin matkalta. Ajoneuvojen määrät vaihtelevat muuta-masta tuhannesta ajoneuvosta reiluun 10 000 ajoneuvon/vrk katuosuudesta riippuen. Reitillä 4 liikenne-määrät ovat reitin eri osissa noin 6 500–8 700 ajoneuvoa/vrk, mutta lyhyellä matkalla kaupungin keskusta-alueen läheisyydessä yli 13 000 ajoneuvoa/vrk. Reitin 5 viereisen Savilahdentien liikennemäärät ovat arki-vuorokausina keskimäärin noin 20 000 ajoneuvoa kun taas liikennemäärä moottoritiellä Savilahdentien kohdalla on keskimäärin 36 700 ajoneuvoa/vrk (Väylävirasto 2019). Liikennemäärätiedot moottoritien liikennemääriä lukuun ottamatta on saatu sähköpostilla Kuopion kaupungin kaupunkisuunnittelupalveluista elokuussa 2019 ja ne vastaavat vuoden 2018 liikennelaskennan tuloksia.

2.5 Mittaustulosten käsittely

Mittauspäiväkohtaisista PM₁₀- ja PM_{2,5}-suodatinnäytteistä määritettiin massapitoisuudet gravimetrisesti. Jatkuvat toimistien PM_{2,5}- ja PM₁₀-mittausten laatu varmistettiin vertaamalla päiväkohtaista fotometristä keskipitoisuutta päiväkohtaiseen gravimetrisen keskipitoisuuteen. Gravimetristen ja fotometristen pitoi-suustasojen välille muodostettiin regressioyhtälöt, joiden perusteella jatkuvatoimistien mittalaitteiden pitoi-suustasot korjattiin vastaamaan gravimetristen mittausten pitoisuuksia.

Henkilökohtaisista altistumismittauksista laskettiin reittikohtaiset keskiarvot aamupäiville ja iltapäiville. Vastaavat keskiarvot laskettiin myös mittausrasteja lähimpien mitta-asemien tuloksista. Reitin 1 varrella ei ollut yhtään mitta-asemaa, joten sitä verrattiin sekä Savilahden mitta-asemaan että Tasavallankadun mitta-asemaan. Reitin 4 toinen pää alkoi Savilahden mitta-asemalta ja toinen pää oli ruutukaavakeskus-tan reuna-alueella, joten kävelijän altistumispitoisuuksia verrattiin sekä Savilahden mitta-aseman että ruutukaavakeskustassa sijaitsevan Maaherrankadun mitta-aseman pitoisuuksiin. Vertailujen perusteella valittiin näiden kävelyreittien pitoisuuksia paremmin kuvastava mitta-asema. Kaikista reiteistä muodostu-

nutta ympyräreittiä tarkasteltiin kolmen reitin varrella olleen mittausaseman lisäksi myös ympyräreitin keskelle jääneen Niiralan mittausaseman pitoisuuksiin.

Henkilökohtaisten altistumispitoisuuksien ja mittausasemien pitoisuustasojen välistä yhteyttä eri reiteillä tarkasteltiin numeerisesti ja visuaalisesti vertaamalla valittuun mittausasemaan. Lisäksi ympyräreitin pitoisuuksia verrattiin kaikkiin neljään mittausasemaan. Silmämääräisesti arvioitun ajoväylän pinnan kosteuden vaikutusta PM_{10} -, $PM_{2.5}$ -, BC- ja PNC-pitoisuuksiin tarkasteltiin sekä keskimääräisesti että mittauskohtaisesti.

Katupölykauden aikaisten mittausten lisäksi ruutukaavakeskustan alueelta tarkasteltiin myös keskitetyn hiekanpoiston jälkeisiä mittauksia, jotka tehtiin aikavälillä 15.4.–29.4.2019. Näiden mittausten käsittely ja tulokset on kuvattu Ympäristö ja Terveys-lehden numerossa 6:2019 (Salonen ym. 2019).

3 Tulokset ja pohdinta

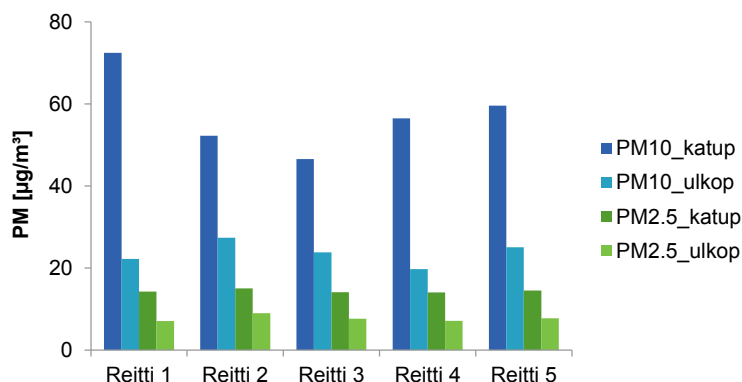
3.1 Kävelijän henkilökohtaisten altistumismittausten keskimääräiset pitoisuustasot

Katupölykauden aikana karkeiden hengitettävien hiukkasten määrä on yleisesti keskimääräisiä pitoisuustasoa suurempi erityisesti vilkkaasti liikennöidyillä alueilla. Kaikki tässä tutkimuksessa mukana olleet kävelyreitit ja mittausasemat ympyräreitin keskellä olevaa Niiralan pientaloalueelle sijoittuvaa mittausasema lukuun ottamatta voidaan ajatella sijoittuvan tällaisille alueille. Katupölyaikana kaupunki-ilmassa leijuu runsaasti katujen pinnalta irtoavaa hienoaainesta, joka leviää tuulen ja liikenteen mukana ympäristöön. Sen sijaan ajoneuvojen pakokaasupäästöistä peräisin olevia kokoluokaltaan pienempiä hiukkasia esiintyy kaupunkiympäristössä oletettavasti tasaisemmin vuoden ympäri.

Keskimääräiset PM_{10} - ja $PM_{2.5}$ -pitoisuudet eri mittausreiteillä katupölykaudella sekä katupölykauden ulkopuolella tehdyissä mittauksissa on esitetty kuvassa 2. PM_{10} -pitoisuustasot olivat katupölykauden ulkopuolella tehtyjen mittausjaksojen aikana keskimäärin noin puolet tai selvästi alle puolet katupölykauden aikaisiin pitoisuuksiin verrattuna.

Reitin 1 PM_{10} -pitoisuustaso oli selvästi muita korkeampi. Reitti 1 sijoittuu Kuopion kaupungin läpi kulkevan moottoritien molemmille puolelle ja kävelyreitti alittaa moottoritien. Moottoritien suurien ajonopeuksien tuottamat ilmapirtaukset kuljettavat tehokkaasti pölyä tien ympäristöön. Reitin 3 keskimääräinen pitoisuus oli katupölykauden aikana muita reittejä pienempi. Reitti 3 kulkee Kuopion ruutukaavakeskustan alueella, missä ajonopeudet ovat muita reittejä alhaisempia. Niiralan kaupunginosan läpi kulkeneen reitin 4 keskimääräinen pitoisuus vastasi katupölykaudella lähes Savilahdentien vierellä kulkeneen reitin 5 keskimääräistä pitoisuutta huolimatta siitä, että ajonopeus Niiralankadulla on pienempi. Savilahden alue on kuitenkin ympäristöltään avoimempi ja kevyenliikenteen väylä sijaitsee etäämmällä ajoradasta, kun taas Niiralankadulla kävelytie kulkee aivan ajoradan reunassa. Vilkaasti liikennöidyn Tasavallankadun varrella kulkeneen reitin 2 keskimääräinen pitoisuus edusti katupölykauden mittauksissa keskitasoa, mutta oli kuitenkin korkein katupölykauden ulkopuolella.

$PM_{2.5}$ -pitoisuus oli PM_{10} -pitoisuuksien tavoin selvästi matalampi katupölykauden ulkopuolen mittauksissa, mutta ero ei ollut niin suuri kuin PM_{10} -pitoisuudella. Keskimääräisissä $PM_{2.5}$ -pitoisuustasoissa ei ollut merkittäviä eroja eri reittien välillä.

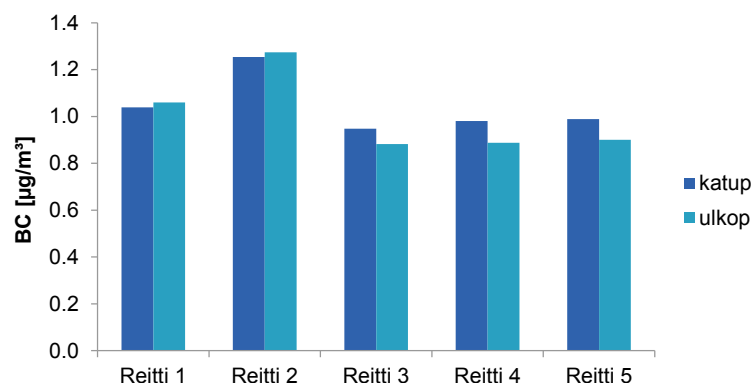


Kuva 2. Keskimääräiset PM_{10} - ja $\text{PM}_{2.5}$ -pitoisuudet eri mittausreiteillä katupölykaudella sekä katupölykauden ulkopuolella.

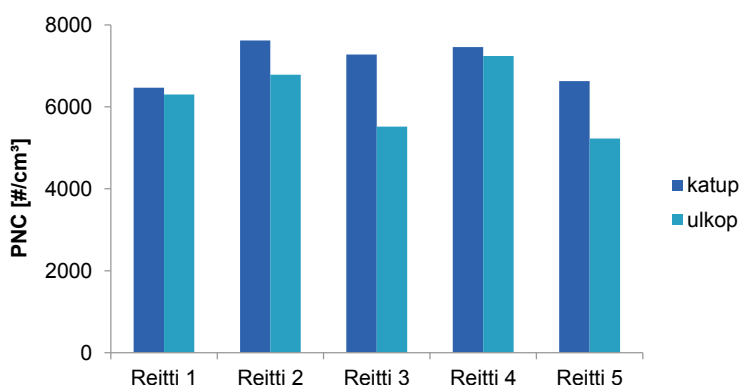
Tutkimuksessa mittaukset pyrittiin ajoittamaan poutapäiville, jotta kävellyt katuosuudet olisivat olleet pääosin kuivia. Tämän myötä tarkastelussa ei ole sateisia ja märkiä päiviä, jolloin pitoisuustasot ovat yleisen tietämyksen mukaan pienempiä. Näin ollen nyt mitatut pitoisuudet eivät täysin kuvasta keskimääräisiä altistumistasoja katupölykauden aikana, mutta antavat hyvän kuvan altistumistasoista päivinä, jolloin katupölyä esiintyy kaupunki-ilmassa.

Polttoeräisiä lähteitä, kuten ajoneuvojen pakokaasupäästöjä, kuvaavien mustahiilen ja hiukkasten lukumäärän keskimääräiset pitoisuustasot katupölykaudella ja sen ulkopuolella on esitetty kuvissa 3 ja 4. Mustahiilen pitoisuudessa ei esiintynyt suurta eroa katupölykauden ja muun ajan välillä, mutta lukumääräpitoisuus oli jonkin verran alhaisempi katupölykauden ulkopuolella erityisesti keskustan alueella (reitti 3) sekä Savilahden alueella (reitti 5). Ulkoilman lämpötila vaikuttaa huomattavasti hiukkasten lukumäärään. Mittausjaksojen välillä ei kuitenkaan ollut suurta eroa lämpötilassa eikä ilmankosteudessa. Keskimääräinen lämpötila Savilahdessa oli katupölykaudella $5,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($28,3\text{--}12,4$) ja katupölykauden ulkopuolella $6,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($6\text{--}8,5$ ja $18\text{--}20,9$) ja suhteellinen kosteus vastaavasti $51,9\%$ ($28,3\text{--}12,4$) ja $65,8\%$ ($6\text{--}8,5$ ja $18\text{--}20,9$).

Mustahiilen keskimääräinen pitoisuustaso reitillä 2 oli selvästi muita reittejä suurempi. Reitti 2 kulki aivan vilkkaasti liikennöidyn Tasavallankadun vierellä. Raskaiden ajoneuvojen osuus Tasavallankadun liikennemäärästä on päivisin noin 7% (<https://www.kuopio.fi/meluntorjunnan-toimintasuunnitelma>; kohdekortti Tasavallankatu 6.4.2018). Mittausten aikana tuulen suunta oli harvoin pohjoisesta, joten mitattujen mustahiilipitoisuuksien lähde ei todennäköisesti ollut läheisen Niiralan pientaloalueen puunpoltto.



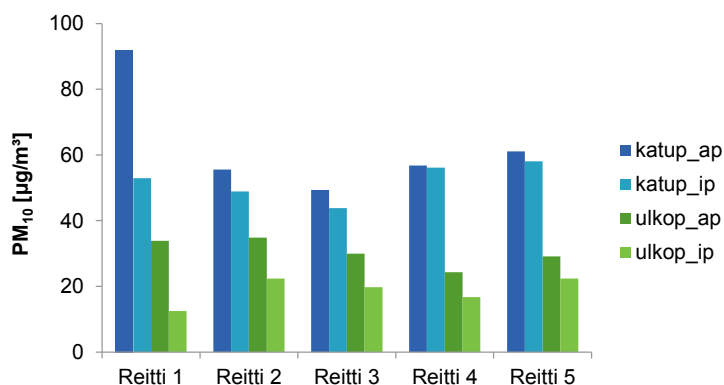
Kuva 3. Keskimääräiset mustahiilipitoisuudet eri reiteillä katupölykaudella ja katupölykauden ulkopuolella.



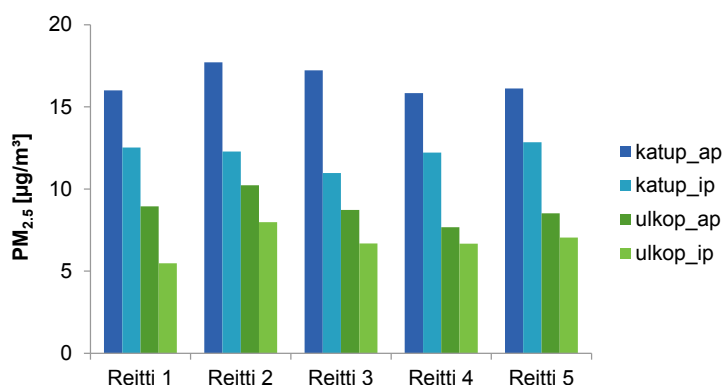
Kuva 4. Keskimääräiset hiukkaslukumääräpitoisuudet eri reiteillä katupölykaudella ja katupölykauden ulkopuolella.

Kaikilla reiteillä sekä PM_{10} - että $PM_{2.5}$ -pitoisuus oli suurempi aamupäivällä kuin iltapäivällä niin katupölykauden aikana kuin sen ulkopuolellakin (kuvat 5 ja 6). Aamun ruuhka-aika on yleensä kestoaltaan lyhyempi, kun taas iltaruuhka jakaantuu pidemmälle aikavälille. Mittaukset tehtiin ruuhka-aikojen ulkopuolella, joten ruuhka-aika ei suoraan vaikuttanut pitoisuustasoihin. Aamupäivän mittaukset alkoivat kuitenkin pian ruuhka-ajan jälkeen, jolloin ruuhka-aikana liikenteen nostattamaa pölyä oli todennäköisesti vielä ilmassa. Sen sijaan iltapäivällä ennen iltaruuhkan alkamista aamuliikenteen ilmaan nostattama pöly oli jo ehtinyt laskeutua eikä näkynyt mittauksissa. Suurimmat erot PM_{10} -pitoisuuksissa aamu- ja iltapäivän välillä oli reitillä 1, jonka keskimääräinen PM_{10} -pitoisuus oli aamupäivisin lähes 1,7-kertainen muiden reittien pitoisuuksiin verrattuna. Vaikka suurimmat PM_{10} -pitoisuudet mitattiin katupölykauden aikana, aamu- ja iltapäivän välinen ero oli hieman suurempi katupölykauden ulkopuolella kuin sen aikana. $PM_{2.5}$ -pitoisuuksissa aamupäivän ja iltapäivän välinen ero oli huomattavasti pienempi kuin PM_{10} -pitoisuuksissa ja katupölykaudella suurempi kuin sen ulkopuolella.

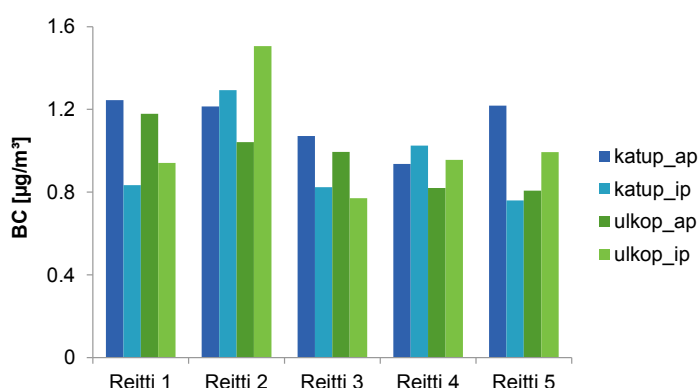
Mustahiilen pitoisuuksissa ei ollut selvää trendiä aamu- ja iltapäivän välillä (kuva 7). Hiukkasten lukumääräpitoisuudet olivat katupölykaudella aamupäivisin iltapäivän pitoisuuksia korkeampia (kuva 8). Katupölykauden ulkopuolella lukumääräpitoisuuksissa ei ollut suuria eroja aamu- ja iltapäivän välillä, paitsi reitillä 4, jossa pitoisuus ylitti 13 000 hiukkasta/cm³ kahdessa iltapäivämittauksessa.



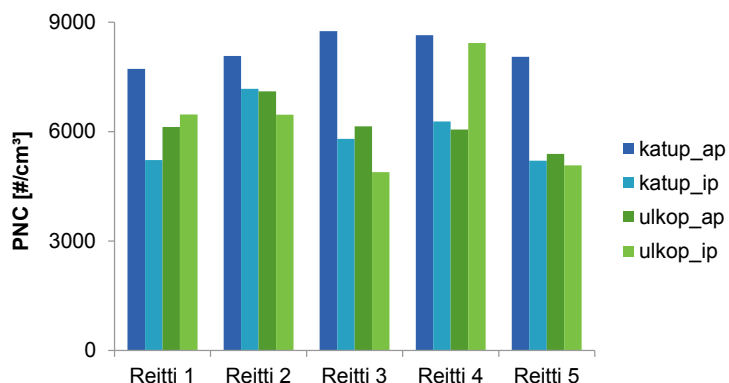
Kuva 5. Keskimääräiset PM_{10} -pitoisuudet aamu- ja iltapäivisin eri mittausreiteillä katupölykaudella sekä katupölykauden ulkopuolella.



Kuva 6. Keskimääräiset PM_{2.5}-pitoisuudet aamu- ja iltapäivisin eri mittausreiteillä katupölykaudella sekä katupölykauden ulkopuolella.



Kuva 7. Keskimääräiset mustanhiilen pitoisuudet aamu- ja iltapäivisin eri mittausreiteillä katupölykaudella sekä katupölykauden ulkopuolella.



Kuva 8. Keskimääräiset hiukkasten lukumääräpitoisuudet aamu- ja iltapäivisin eri mittausreiteillä katupölykaudella sekä katupölykauden ulkopuolella.

3.2 Kävelijän reittikohtaisten altistumismittausten pitoisuustasojen vertailu mittausasemien pitoisuuksiin

Kävelijän henkilökohtaisten altistumispitoisuuksien ja kiinteiden mittausasemien pitoisuustasojen vertailua varten valittiin kolmelle reitille (reitit 2, 3 ja 5) reittiä lähinnä oleva mittausasema. Reiteille 1 ja 4 oli kaksi vaihtoehtoista mittausasemaa, joista vertailuun valittiin kävelymittausten ja mittausasemien välille muodos-

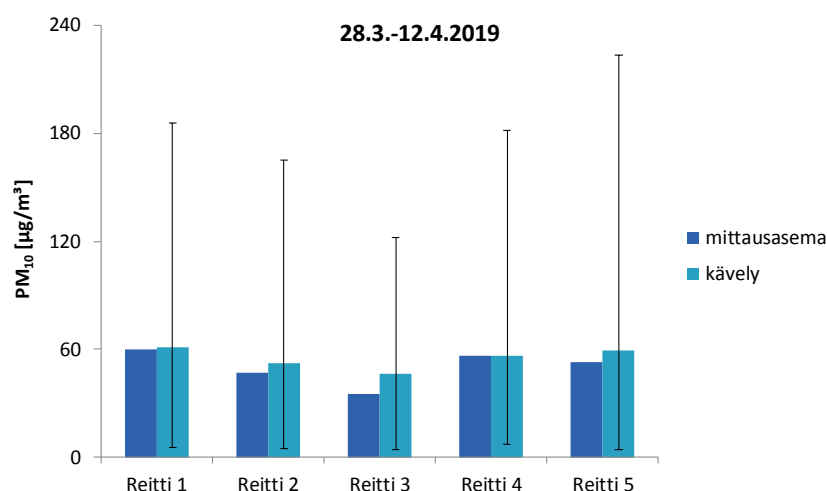
tettujen regressioyhtälöiden perusteella parempi (liite 2). Kävelyreittien ja mittausasemien välisen yhteyden tarkasteluun valitut kävelyreitti-mittausasemaparit on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Kävelyreittien pitoisuustarkastelussa käytetyt Kuopion kaupungin ylläpitämät kiinteät mittausasemat.

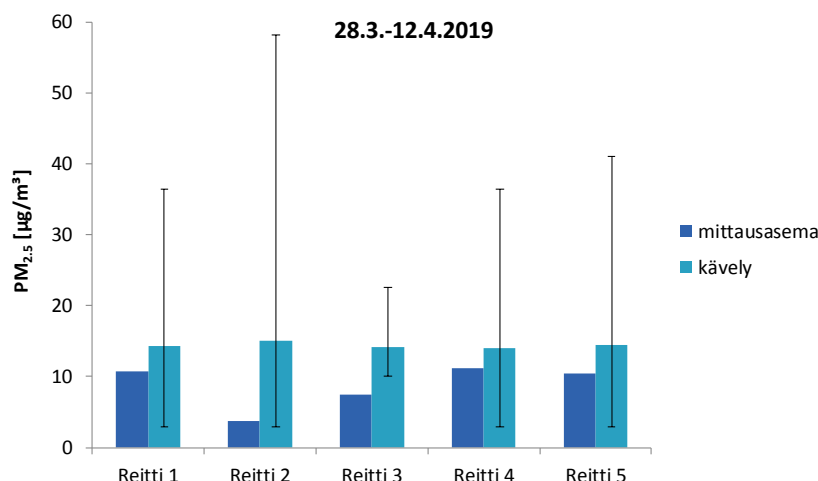
Reitti n:o	Mittausasema
1	Savilahti
2	Tasavallankatu
3	Maaherrankatu
4	Savilahti
5	Savilahti

Keskimääräiset PM_{10} - ja $PM_{2.5}$ -pitoisuudet eri kävelyreiteillä ja samanaikaisesti mitattuna kaupungin kiinteillä mittausasemilla katupölykauden aikana on esitetty kuvissa 9 ja 10. Kävelyreiteille on esitetty myös kaikkien katupölykauden aikaisten mittausjaksojen minuuttiarvoista lasketut pitoisuuden vaihtelua kuvaavat 10. ja 90. prosenttipisteet. Tulosten perusteella kutakin reittiä parhaiten kuvaavan mittausaseman PM_{10} -pitoisuustasot vastasivat suhteellisen hyvin kävelijän altistumista (kuva 9). Ero näiden kahden mitatun pitoisuuden välillä oli suurin Kuopion ruutukaavakeskustan alueella (reitti 3). Ruutukaavakeskustan kävelyreitti kulki korkeiden rakennusten vierellä, jolloin pölypitoisuudet eivät laimene yhtä hyvin kuin avoimemmilla paikoilla ja näkyvät korkeampina pitoisuuksina pienellä alueella.

Kävelijän altistuminen $PM_{2.5}$ -pitoisuustasolle oli selvästi korkeampi kaikilla mittausreiteillä kuin mitä mittausaseman pitoisuustasot näyttivät (kuva 10). Ero pitoisuustasojen välillä korostui erityisesti reiteillä 2 ja 3. Tämän perusteella mittausaseman antama pitoisuus on aliarvio todellisesta altistumisesta erityisesti $PM_{2.5}$ -pitoisuudelle. Lisäksi kävelijä altistuu lyhytaikaisesti keskiarvoa paljon suuremmille pitoisuuksille.



Kuva 9. Keskimääräiset PM_{10} -kokoluokan hiukkasten pitoisuudet kävelyreiteillä ja mittausasemilla. Pystyjanan alapää kuvaa kävelymittausten minuuttipitoisuuksien 10. prosenttipistettä ja yläpää 90. prosenttipistettä.



Kuva 10. Keskimääräiset PM_{2,5}-kokoluokan hiukkasten pitoisuudet kävelyreiteillä ja mittausasemilla. Pystyjanan alapää kuvaa kävelymittausten minuuttipitoisuuksien 10. prosenttipistettä ja yläpää 90. prosenttipistettä.

Hajontakuviot katupölykauden aikaisen mittausjakson keskimääräisistä PM₁₀- ja PM_{2,5}-pitoisuuksista reiteillä ja läheisellä mittausasemalla aamupäivien ja iltapäivien kävelyjaksojen aikana on esitetty kuvissa 11 ja 12. Pitoisuustasossa esiintyi samanlaista vaihtelua vuorokauden ajasta riippumatta, eikä aamu- ja iltapäivien välillä ole hajontakuvioissa nähtävissä systemaattista eroa.

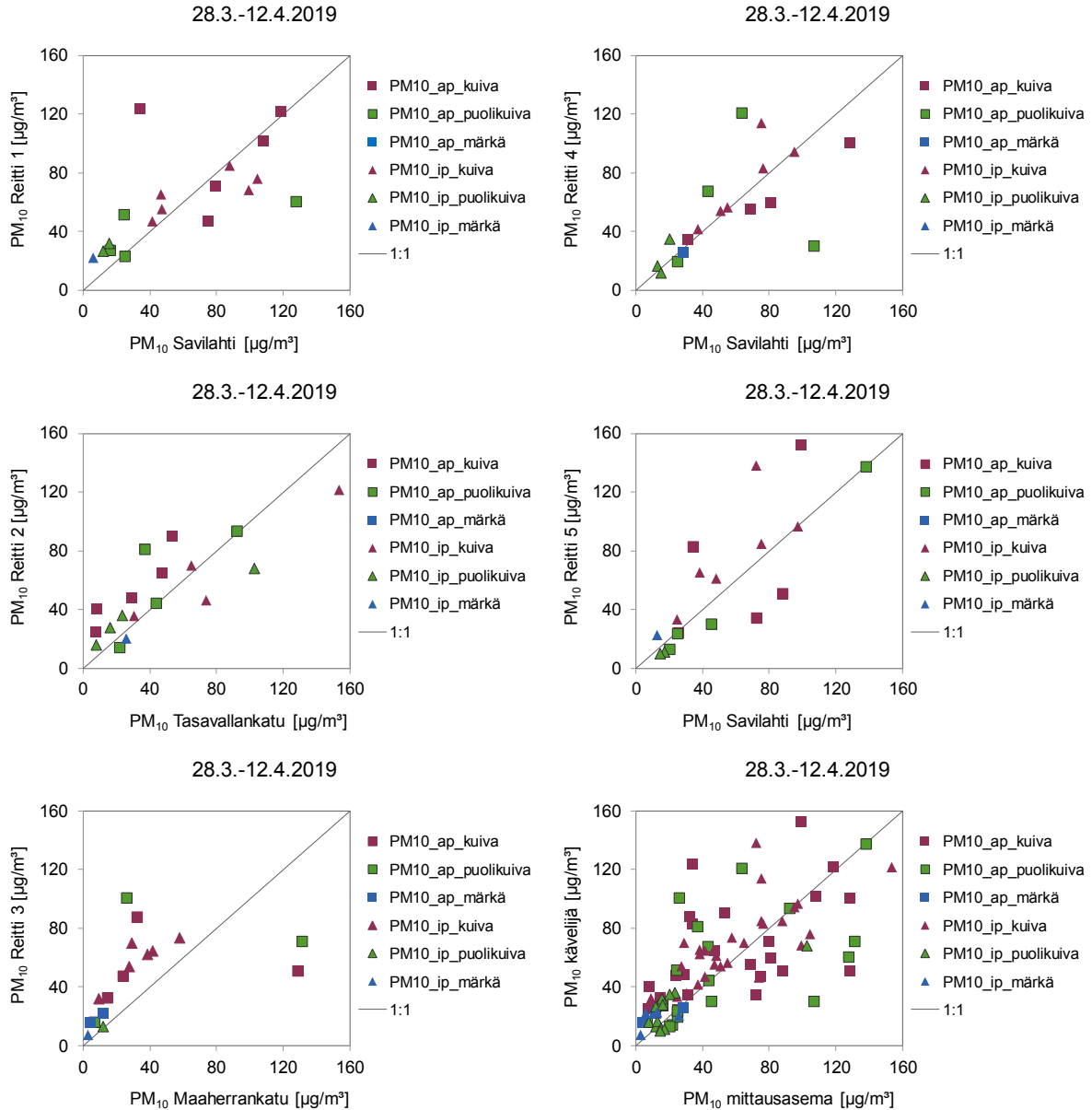
Katupölykauden ulkopuolella tehdyistä mittauksista piirretyt hajontakuviot keskimääräisille PM₁₀- ja PM_{2,5}-pitoisuuksille reiteillä ja läheisillä mittausasemilla on esitetty kuvissa 13 ja 14. Silmämääräisesti tarkasteltuna PM₁₀-pitoisuustasot olivat katupölykauden ulkopuolella keskimäärin alle puolet katupölykauden aikaisista pitoisuuksista (Kuvat 11–14), mikä huomattiin jo kappaleen 3.1 pitoisuustarkasteluissa.

Hajontakuvioista erottuu selvästi, että reitin 2 kävelijän PM_{2,5}-altistumis-pitoisuudet olivat huomattavasti korkeampia kuin vastaavaan aikaan mitatut keskimääräiset pitoisuustasot kiinteällä mittausasemalla (Kuva 12, reitti 2). Tulokset olivat samansuuntaisia myös katupölykauden ulkopuolella mitatuissa pitoisuustasot. Tarkasteltaessa PM₁₀-kokoluokan hiukkasia, vastaavaa eroa ei näkynyt reitillä 2. Reitillä 2 pitoisuustasoihin verrattu Tasavallankadun mittausasema sijoittuu liikennemäärien ja ajonopeuksien suhteen paikkaan, jossa pitoisuustasojen voisi olettaa nousevan suuriksi. Asema sijaitsee muutaman metrin päässä ajoradasta viereisen rakennuksen läheisyydessä, mutta ero näiden kahden mittauksen välillä vaikuttaa silti varsin suurelta, eikä sille löydy selvää selitystä.

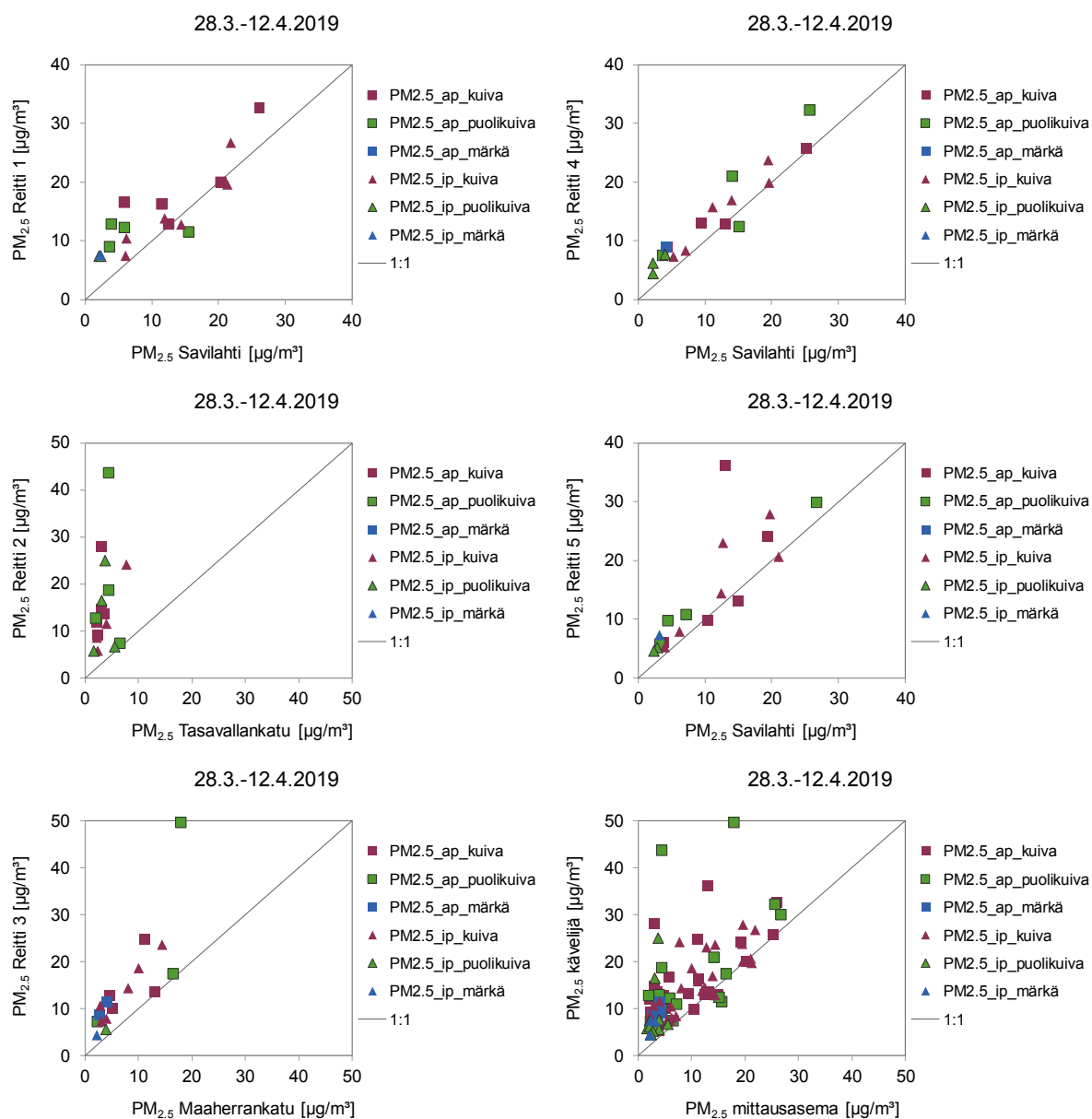
Reitin 3 mittauksissa ruutukaavakeskustan alueella kävelijän altistumis-pitoisuudet olivat pääsääntöisesti suurempia kuin Maaherrankadun mittausasemalla. Reitillä 3 kaksi aamupäivällä mitattua PM₁₀-pitoisuusparia poikkesivat selvästi muista mittauksista (kuva 11, reitti 3). Näissä mittauksissa PM₁₀-pitoisuus oli suuri Maaherrankadun mittausasemalla, mutta kävelijän samanaikaisesti mitatut pitoisuustasot olivat selvästi pienempiä. Reitti 3 kulki ruutukaavakeskustan läpi ja reitin varrella oli Kuopion kokoiselle kaupungille tyypillisiä rakennustyömaita, jotka ovat voineet vaikuttaa erityisesti PM₁₀-kokoluokan hiukkasten pitoisuustasoihin paikallisesti, jolloin korkea pitoisuustaso mittausasemalla ei näy samanaikaisesti kävelymittauksissa. Myös katupölykauden ulkopuolisissa mittauksissa havaittiin yksi vastaava pitoisuuspari iltapäivän mittauksissa.

Kun kävelijän altistumis-pitoisuudet kaikilta reiteiltä ja niitä vastaavilta asemilta laitettiin samaan kuvaan, pystyttiin havaitsemaan, että mittausaseman tulosten käyttö PM₁₀-altistumisen arvioimisessa olisi välillä johtanut liian pieneen ja välillä liian suureen arvioon (Kuvat 11 ja 13, kävelijä). Korrelaatiokerroin (r) oli 0,65. Pienhiukkasten osalta (kuvat 12 ja 14, kävelijä) kiinteä mittausasema aliarvioi kävelijän altistumista ($r=0,65$). Kuitenkin reitin 2 tulosten poistaminen katupölykauden PM_{2,5}-tuloksista paransi korrelaatiota ($r=0,80$) ja regressiosuoran kulmakertoimen oli 0,98.

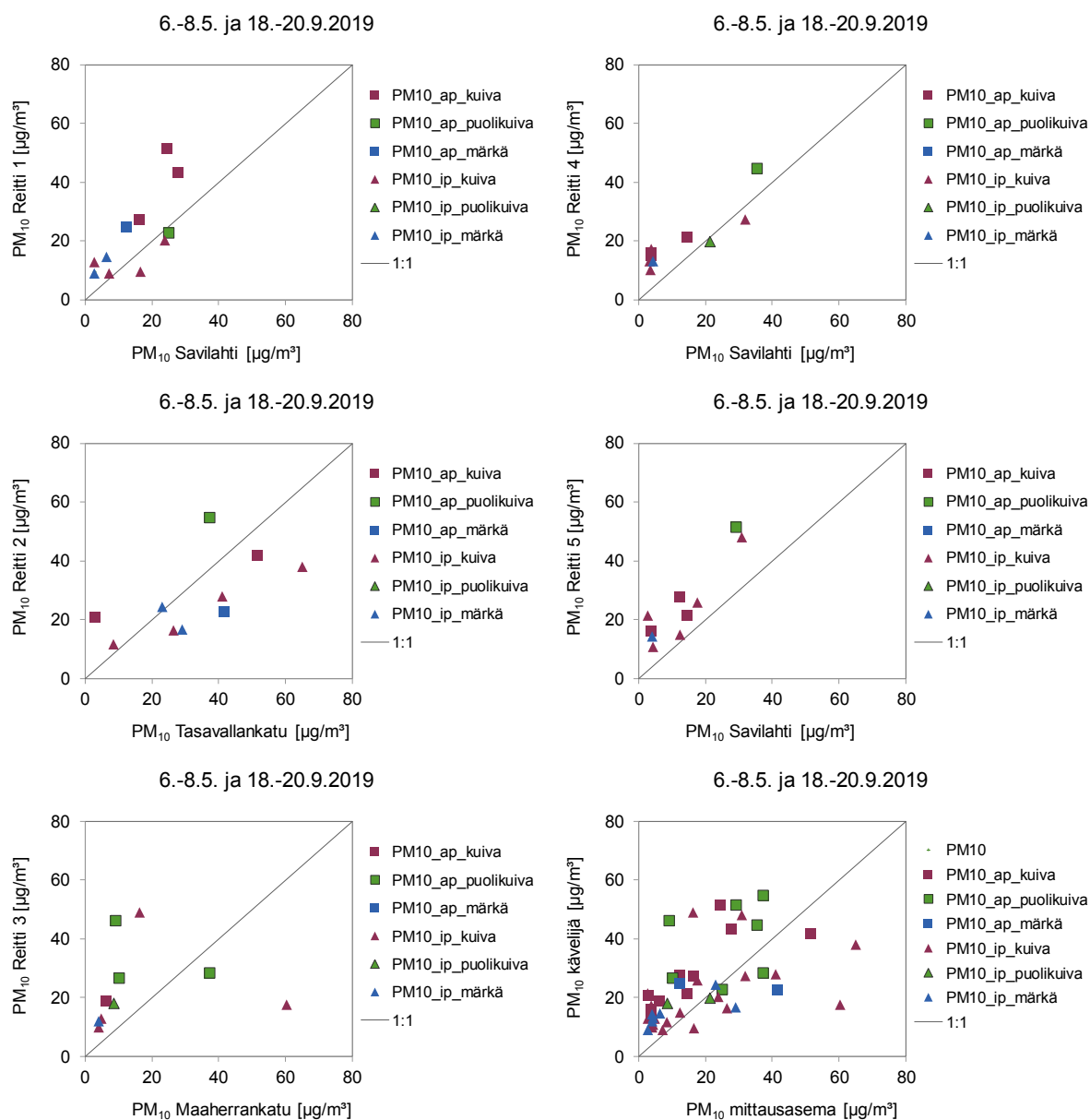
Mittausasemalla näytteenotto tapahtuu korkeammalla kuin henkilökohtainen altistuminen, mikä voi osaltaan selittää eroja mitatuissa pitoisuuksissa. Ajoneuvoliikenteen aiheuttamien pistemäisten päästöjen aiheuttamat pitoisuustasot voivat myös vaihdella liikenneympäristöissä hyvinkin merkittävästi, eikä kiinteä mittausasema kuvasta tällöin välttämättä kovin hyvin kaupungissa liikkuvien altistumista. $PM_{2.5}$ -kokoluokan hiukkasia on jossakin määrin katupölyssä, mutta ne ovat kuitenkin suurelta osin peräisin muun muassa ajoneuvojen pakokaasupäästöistä sekä kaukokulkeumasta, kun taas PM_{10} -hiukkaset edustavat karkeampia katu- ja rakennuspölyn tuottamia hengitettäviä hiukkasia.



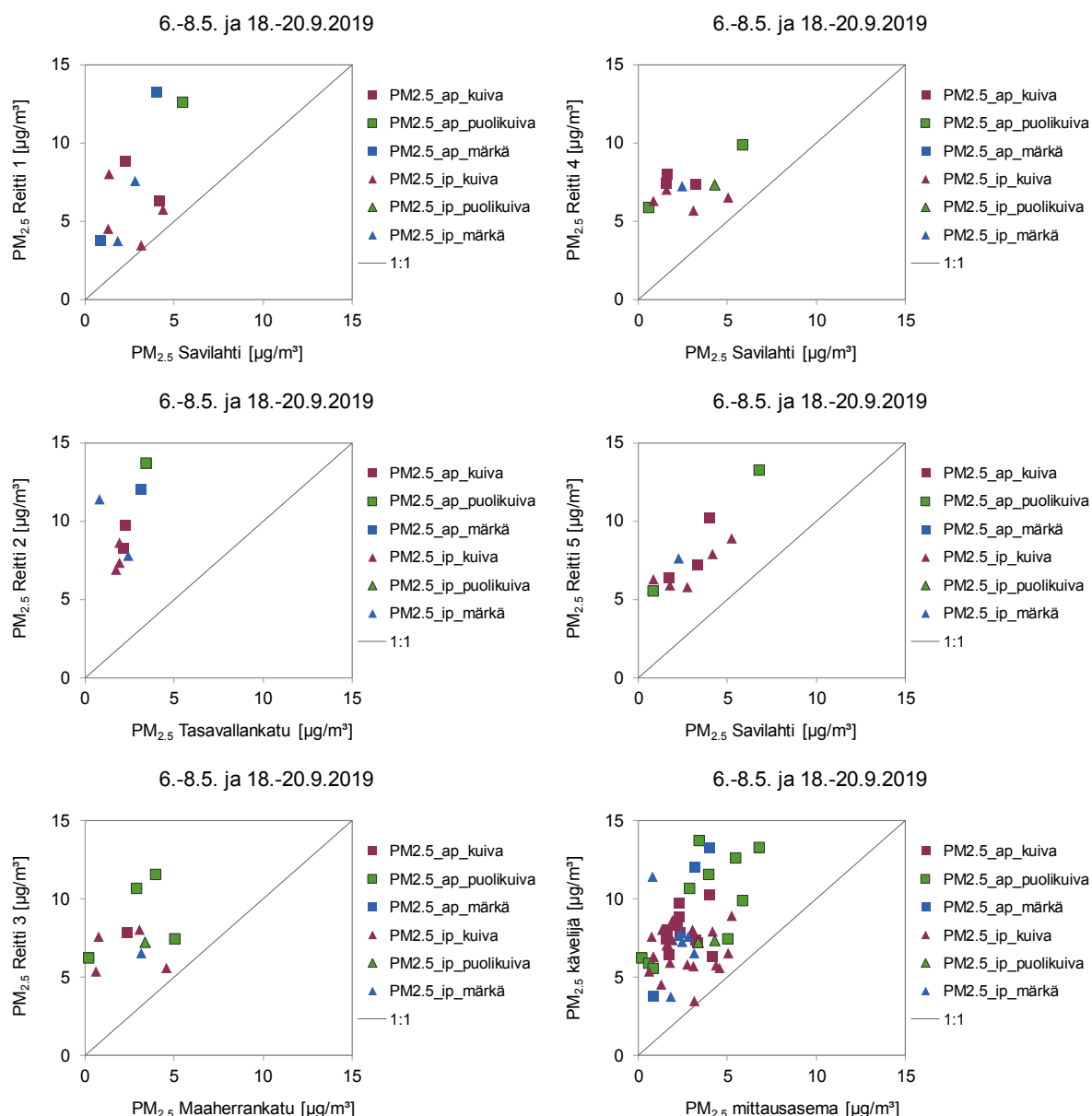
Kuva 11. Hajontakuviot eri kävelyreittien ja reittiä lähellä sijainneen ilmanlaadun kiinteän mittausaseman PM_{10} -pitoisuustasojen välillä aamu- ja iltapäivisin, kun kävelyreitit vieressä kulkeneen ajoneuvoväylän tienpinta oli kuiva, puolikuiva tai märkä. Mittaukset tehtiin katupölykaudella 28.3.–12.4.2019.



Kuva 12. Hajontakuviot eri kävelyreittien ja reittiä lähellä sijainneen ilmanlaadun kiinteän mittausaseman PM_{2.5}-pitoisuustasojen välillä aamu- ja iltapäivisin, kun kävelyreitillä vieressä kulke-
neen ajoneuvoväylän tienpinta oli kuiva, puolikuiva tai märkä. Mittaukset tehtiin katu-
pölykaudella 28.3.–12.4.2019.



Kuva 13. Hajontakuviot eri kävelyreittien ja reittiä lähellä sijainneen ilmanlaadun kiinteän mittausaseman PM₁₀-pitoisuustasojen välillä aamu- ja iltapäivisin, kun kävelyreitin vieressä kulke-
neen ajoneuvoväylän tienpinta oli kuiva, puolikuiva tai märkä. Mittaukset tehtiin kevään katu-
pölykauden jälkeen esiintyneen runsaan sadejakson jälkeen 6.-8.5. ja syksyllä 18.-20.9.2019.

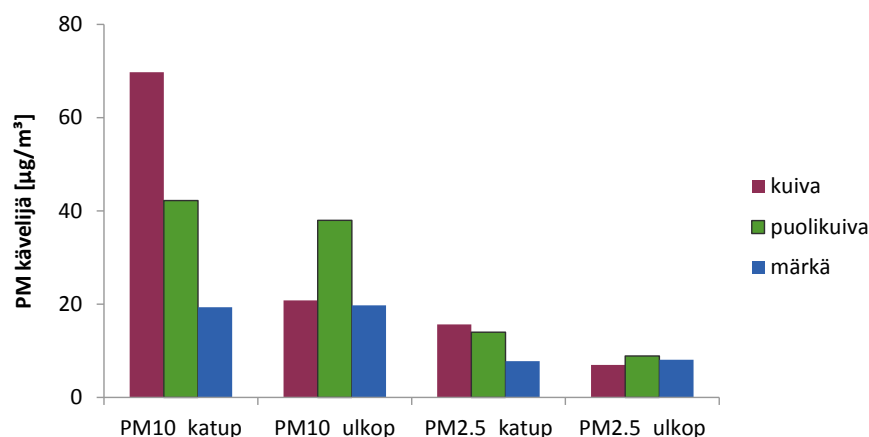


Kuva 14. Hajontakuviot eri kävelyreittien ja reittiä lähellä sijainneen ilmanlaadun kiinteän mittausaseman $PM_{2.5}$ -pitoisuustasojen välillä aamu- ja iltapäivisin, kun kävelyreitillä kulkevan ajoneuvoväylän tienpinta oli kuiva, puolikuiva tai märkä. Mittaukset tehtiin kevään katupölykauden jälkeen esiintyneen runsaan sadejakson jälkeen 6.–8.5. ja syksyllä 18.–20.9.2019.

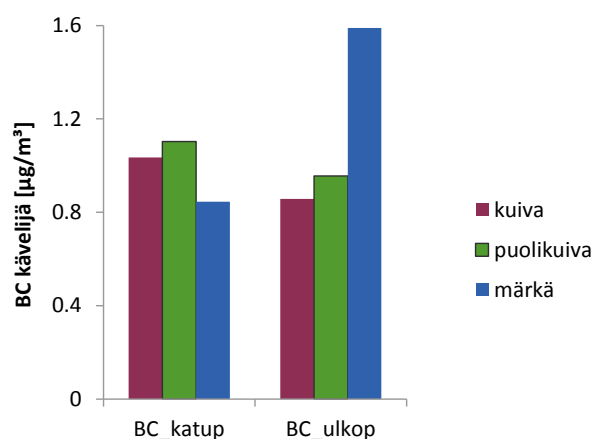
Läheisen ajotien pinnan ollessa märkä sekä kävelijän altistumistasot että mittausaseman pitoisuustasot olivat pieniä molemmissa hiukkaskokoluokissa (Kuvat 11–14). Tienpinnan kosteus sitoo pölyn tienpintaan eikä se nouse pinnalta ympäröivään ilmaan. Ajoradan ollessa puolikuiva pitoisuustasot olivat joskus pieniä, mutta toisinaan ne vastasivat paremmin pitoisuustasoja, joita esiintyi ajoradan ollessa kuiva. Ajotien pinnan kosteuden tarkastelu tehtiin tutkijan havainnoimana kolmeportaisena karkeana arviona keskimääräisestä tien pinnan kosteudesta, jolloin arvioissa on epätarkkuutta erityisesti puolikuivan tien arvioinnissa.

Tarkasteltaessa kaikkien reittien PM_{10} - ja $PM_{2.5}$ -pitoisuuksien keskiarvoja, ne olivat katupölykauden mittauksissa suurimmat tien pinnan ollessa kuiva ja pienimmillään, kun tienpinta oli märkä (Kuva 15). Katupölykauden ulkopuolella ei esiintynyt samanlaista trendiä, sillä keskimääräinen pitoisuus oli korkein tienpinnan ollessa puolikuiva. Tämä on todennäköisesti seurausta siitä, että katupölykauden ulkopuolella hiukkaset ovat enimmäkseen peräisin muualta kuin tien pinnasta, jolloin niitä on ilmassa riippumatta tienpinnan kosteudesta.

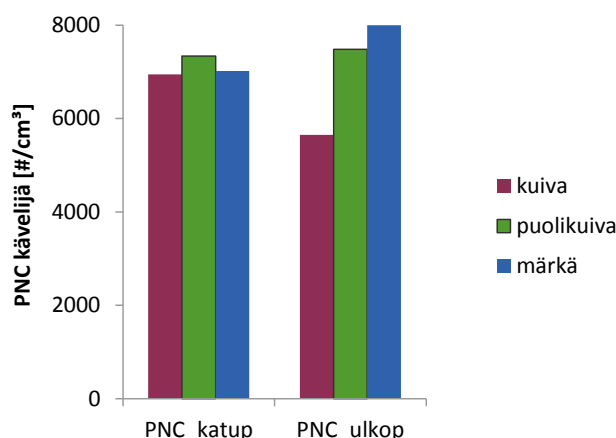
Mustahiilen ja hiukkasten lukumäärän pitoisuustasoille ei näkynyt PM_{10} - ja $PM_{2.5}$ -pitoisuuksien kaltaista trendiä tien pinnan kosteuden mukaan (kuvat 16 ja 17). Katupöly nousee tien pinnasta, kun taas pakokaasun hiukkaspäästöt vapautuvat ilmaan hieman korkeammalta pakoputken päästä. Näin ollen niitä esiintyy ilmassa, vaikka tien pinta olisi kostea ja sitoisi pinnalla olevaa pölyä.



Kuva 15. Kävelijän keskimääräiset altistumistasot PM_{10} - ja $PM_{2.5}$ -hiukkasille katupölykaudella sekä katupölykauden ulkopuolella, kun ajotien pinta on kuiva, puolikuiva tai märkä.



Kuva 16. Kävelijän keskimääräiset altistumistasot mustahiilelle katupölykaudella sekä katupölykauden ulkopuolella, kun ajotien pinta on kuiva, puolikuiva tai märkä.



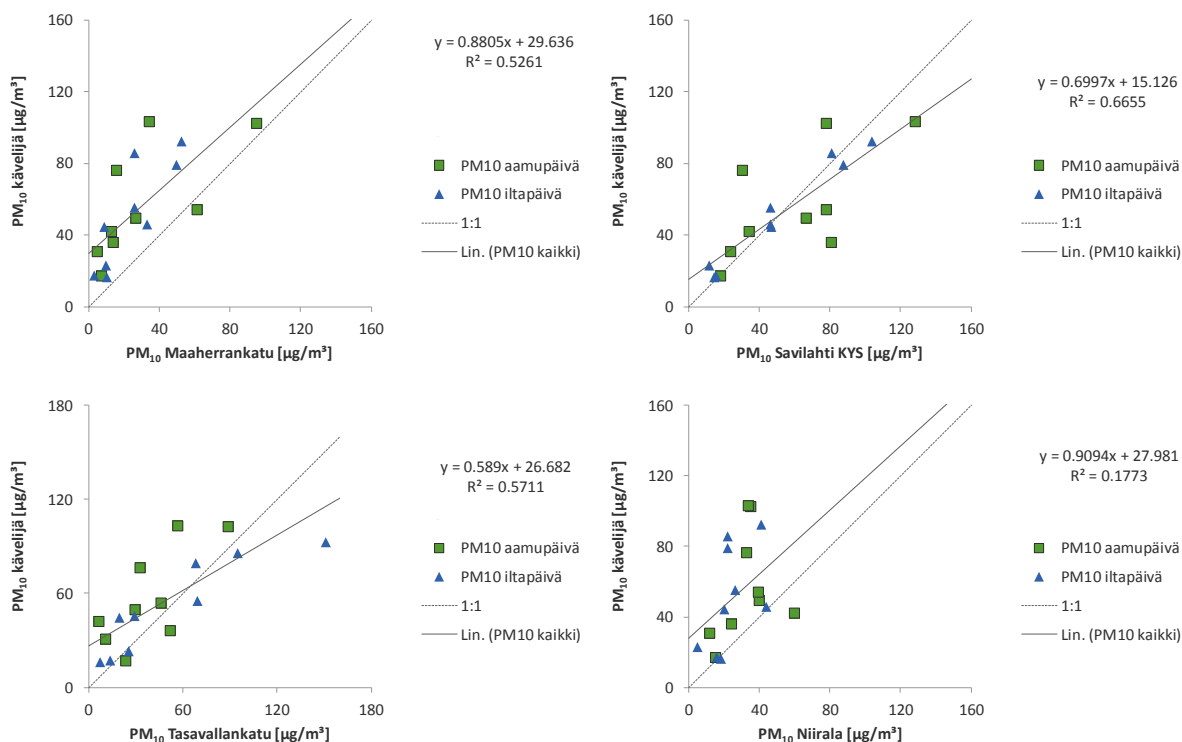
Kuva 17. Kävelijän keskimääräiset altistumistasot hiukkasten lukumääräpitoisuudelle katupölykaudella sekä katupölykauden ulkopuolella, kun ajotien pinta on kuiva, puolikuiva tai märkä.

3.3 Kaikkien reittien yhdistetyn pitoisuustason vertailu eri mittausasemien pitoisuuksiin

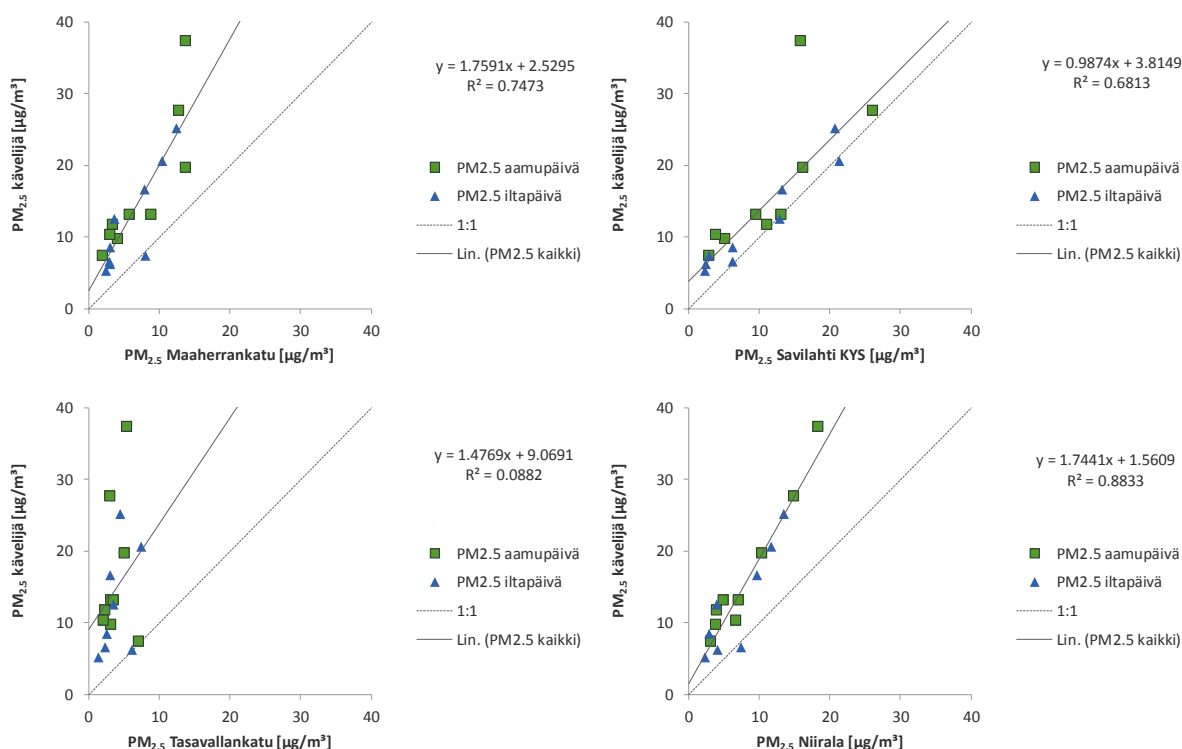
Koko ympyräreitin keskimääräiset PM_{10} - ja $PM_{2.5}$ -pitoisuustasot verrattuna eri mittausasemien samanaikaisiin aamupäivän ja iltapäivän pitoisuustasoihin katupölykauden aikana on esitetty kuvissa 18 ja 19 sekä kaikki mittausjaksot (katupölykaudella ja katupölykauden ulkopuolella tehtyt mittaukset) yhdistettynä liitteessä 3. Kaikki reitit yhdistävälle ympyräreitille laskettu kävelijän PM_{10} -altistumis-pitoisuus korreloi parhaiten Savilahden mittausaseman pitoisuustasojen kanssa. Korrelaatiot kävelijän ja mittausaseman PM_{10} -pitoisuustasoissa olivat katupölykauden mittauksissa hieman parempia kuin kaikki mittausjaksot yhdistävälle aineistolle lasketut.

$PM_{2.5}$ -pitoisuuksien korrelaatiot kävelijän ja mittausasemien välillä olivat parempia kuin PM_{10} -pitoisuustasoilla muuten, mutta Tasavallankadun mittausaseman pitoisuudet eivät tuloksen mukaan selittäneet käytännössä ollenkaan kävelijän henkilökohtaista $PM_{2.5}$ -altistumista. $PM_{2.5}$ -pitoisuustaso korreloi parhaiten Niiralan aseman kanssa, mutta korrelaatio oli varsin korkea myös Maaherrankadun ja Savilahden mittausasemien kanssa. Korrelaatiot eivät juuri eronneet $PM_{2.5}$ -mittauksissa katupölykauden ja kaikki mittausjaksot yhdistävissä aineistoissa.

Kävelijän PM_{10} -altistumis-pitoisuudet olivat välillä pienempiä kuin mittausasemilla mitatut pitoisuudet. Näin ollen ilmanlaadun mittausaseman pitoisuudet yliarvioivat osan ajasta PM_{10} -altistumista. Kävelijän henkilökohtaiset $PM_{2.5}$ -pitoisuustasot sen sijaan olivat lähes poikkeuksetta suuremmat kuin mittausasemalla mitatut, jolloin mittausaseman voidaan sanoa aliarvioivan altistumista suurimman osan ajasta. Hyvä korrelaatio todellisen ja arvioitun altistumisen välillä mahdollistaa luotettavamman terveyshaittojen arvioinnin epidemiologisissa tutkimuksissa. Tässä tutkimuksessa korrelaatio aseman ja kävelijän $PM_{2.5}$ -tasojen välillä oli hyvä, vaikka kyseessä oli liikenneympäristö, jossa voi esiintyä hyvinkin suurta paikallista vaihtelua pitoisuustasoissa. Huolimatta siitä, että mittausaseman $PM_{2.5}$ -pitoisuus on aliarvio todellisesta altistumisesta, suuri pitoisuus asemalla tarkoittaa suurta todellista altistumista. PM_{10} -pitoisuustaso asemalla suhteessa kävelijän altistumiseen vaihteli, eikä PM_{10} -altistumista voida siten arvioida niin luotettavasti mittausasemien perusteella.



Kuva 18. PM₁₀-pitoisuudet verrattuna mittausasemien pitoisuuksiin katupölykaudella, kun kaikkien osareittien mittausaineistot on yhdistetty.



Kuva 19. PM_{2.5}-pitoisuudet verrattuna mittausasemien pitoisuuksiin katupölykaudella, kun kaikkien osareittien mittausaineistot on yhdistetty.

3.4 Keskitetyn hiekoitushiekan poiston vaikutus kävelijän altistumiseen ja kiinteän mittausaseman hiukkaspitoisuuksiin Kuopion ydinkeskustassa

Kuopion keskusta-alueen keskitetyn hiekoitushiekan poiston ja katujen puhdistuksen vaikutus keskustan mittausaseman ja kävelijän henkilökohtaisen altistumisen PM_{10} -pitoisuustasoihin on raportoitu Ympäristö ja Terveys-lehden numerossa 6:2019 (Salonen ym. 2019).

4 Yhteenveto ja tulevaisuuden tutkimus-tarpeet

Kävelijä altistui selkeästi suuremmille keskimääräisille $PM_{2.5}$ -pitoisuuksille kuin mitä mittausasemalla mitatut pitoisuudet antoivat odottaa. Ero ei ollut niin selvä suuremman kokoluokan PM_{10} -pitoisuustasoilla. Pitoisuuksissa ei havaittu merkittäviä eroja aamu- ja iltapäivien välillä.

Altistuminen on selvästi pienempää silloin, kun tien pinta on märkä, jolloin pöly ei nouse katujen pinnalta ympäröivään ilmaan. Sen sijaan tien pinnan ollessa puolikuiva, pölyn määrä vastaa välillä märän pinnan tasoa, mutta toisinaan taas kuivan pinnan tasoa. Tien pinnan kosteudella ei ole vastaavaa vaikutusta pääosin pakokaasupäästöistä peräisin olevien hiukkasten lukumäärän ja mustahiilen pitoisuuksiin.

Tutkimuksessa mittauksia tehtiin pääsääntöisesti poutapäivinä, joten kävellyt katuosuudet olivat pääosin kuivia. Tämän myötä tarkastelussa ei ole sateisia päiviä, jolloin pitoisuustasot ovat yleisen tietämyksen mukaan pienempiä. Mitatut pitoisuudet eivät siis täysin kuvasta keskimääräisiä altistumistasoja katupölykauden aikana, mutta antavat hyvän kuvan altistumistasoista päivinä, jolloin katupölyä esiintyy kaupunki-ilmassa.

Ruutukaavakeskustan alueella olleella mittausreitillä oli rakennustyömaahankkeita, jotka saattoivat josakin määrin vaikuttaa erityisesti reitin 3 PM_{10} -pitoisuustasoihin. Nämä eivät kuitenkaan olleet mittaluokaltaan normaalia suurempia työmaita, joten ne edustavat siksi tavanomaista tilannetta kaupunkiympäristössä.

Ympäristö ja Terveys-lehdessä jo aikaisemmin julkaistussa keskusta-alueen hiekanpoistoa tarkastelevassa osatyössä havaittiin, että kävelijän altistumistasot olivat suuremmat välittömästi keskusta-alueen keskitetyn hiekanpoiston jälkeisenä aikana kuin ennen hiekanpoistoa. Tämä johtui todennäköisesti yksityisten kiinteistönomistajien suorittamasta hiekanpoistosta sekä pölyämiselle otollisesta meteorologiasta. Keskusta-alueen pitoisuustasot pienenevät selvästi vasta runsaiden kevätsateiden jälkeen. (Salonen ym. 2019.)

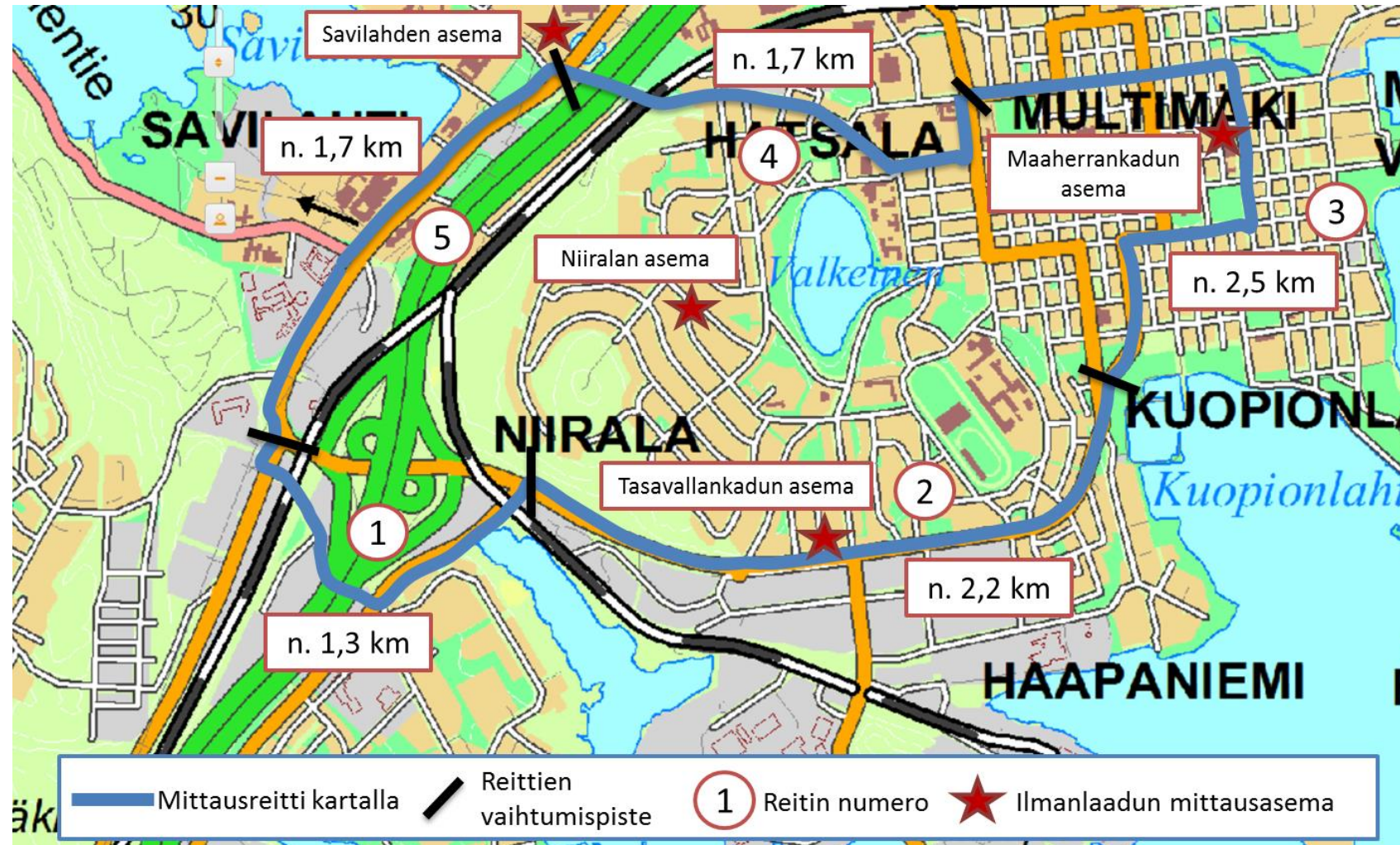
Tulevaisuudessa on tärkeää tutkia lähemmin eri liikennetekijöiden (kevyen ja raskaan autoliikenteen määrä ja ajonopeus, ajoväylän etäisyys kävely- ja pyörätiestä) kvantitatiivista vaikutusta ilmanlaatuun ja liikenneväylien lähellä kävelevien ja pyöräilevien ihmisten henkilökohtaiseen altistumiseen. Näitä tietoja voitaisiin hyödyntää kaupunkirakenteen ja -liikenteen suunnittelussa. Myös katupölyn mahdollinen tunkeutuminen alakerroksissa olevien asuntojen sisäilmaan olisi syytä tutkia.

Kirjallisuus

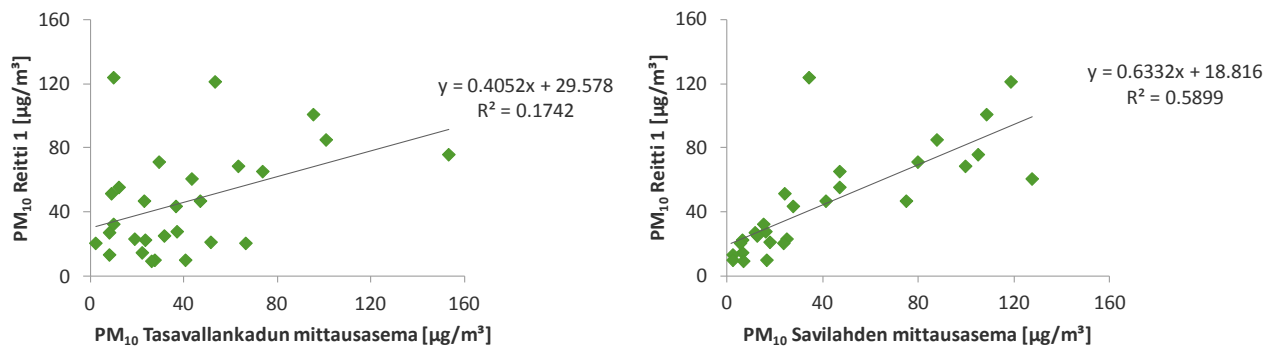
- Kuopion kaupungin alueelliset ympäristönsuojelupalvelut ja JPP-kalibrointi Ky. (2019) Kuopion seudun ilmanlaatu vuonna 2018. Kuopion kaupunki, 2019. Saatavissa: <https://www.kuopio.fi/documents/7369547/7616060/Kuopion+seudun+ilmanlaatu+vuonna+2018/7107c37c-c47b-4342-b14c-fd41bcc75742>.
- Lanki, Timo (2013) Katupölyn vaikutukset terveyteen – Epidemiologinen tutkimus pääkaupunkiseudulla. NASTA-tutkimusohjelma 2011-2013, loppuraportti. Saatavissa: https://asiakas.kotisivukone.com/files/nastatutkimus.kotisivukone.com/tiedostot/tutkimusraportit/lanki_thl_katupolyn_terveysvaikutukset.pdf
- Salonen, Raimo, Siponen, Taina, Taimisto, Pekka, Pärjälä, Erkki (2019) Katupölylle altistuminen Kuopion keskustassa keväällä 2019. Ympäristö ja Terveys -lehti 6:2019.
- Suonheimo, Pirke, Grönroos, Juha, Karvosenoja, Niko, Petäjä, Jouko, Saarinen, Kristiina, Savolahti, Mikko, Silvo, Kimmo (2015) Päästökattodirektiiviehdotuksen ja keskisuurten polttolaitosten direktiiviehdotuksen toimeenpanon vaikutukset Suomessa. Suomen Ympäristökeskuksen raportteja 6/2015. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/153981/SYKEra_6_2015.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Väylävirasto (2019) Liikennemääräkartat. 2019. Saatavissa: <https://julkinen.vayla.fi/webgis-sovellukset/webgis/template.html?config=liikenne> (luettu 4.12.2019).

Liitteet

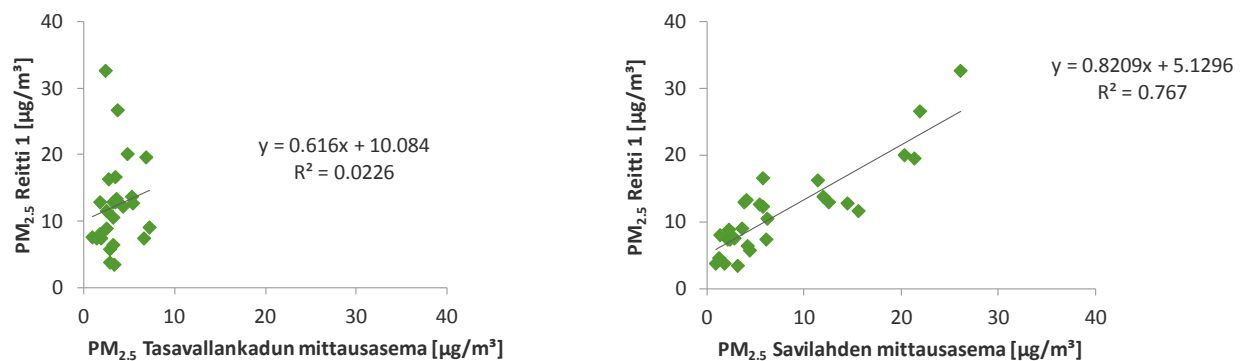
Liite 1. Kartta mittausreiteistä ja Kuopion kaupungin ilmanlaadun mittausasemien sijainnista



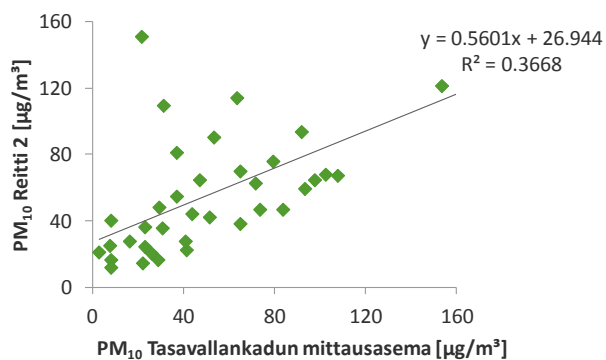
Liite 2. Mittausreittien ja mittausasemien pitoisuustasojen väliset regressioyhtälöt



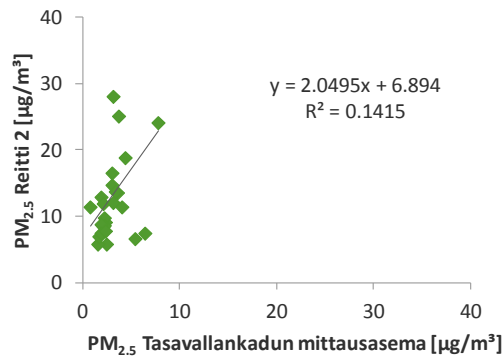
Kuva L2.1. Reitti 1:n ja Tasavallankadun sekä Savilahden mittausasemien tulokset PM₁₀-pitoisuudelle.



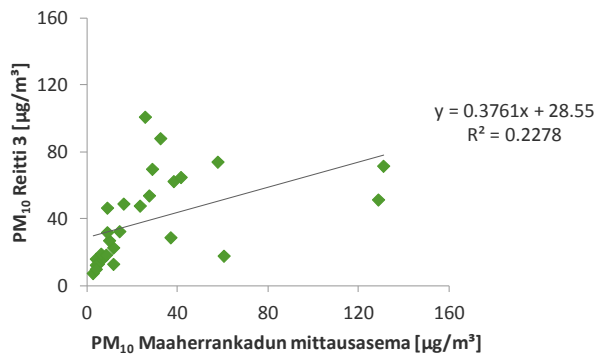
Kuva L2.2. Reitti 1:n ja Tasavallankadun sekä Savilahden mittausasemien tulokset PM_{2.5}-pitoisuudelle.



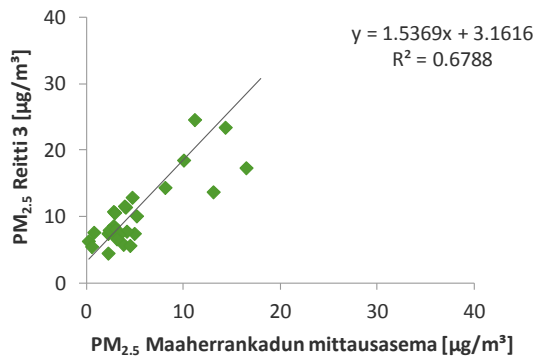
Kuva L2.3. Reitti 2:n ja Tasavallankadun mittausaseman tulokset PM₁₀-pitoisuudelle.



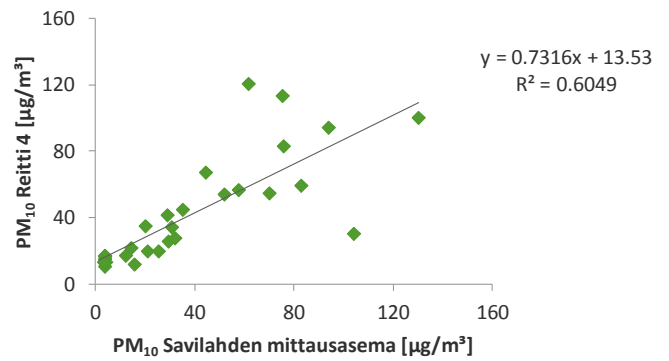
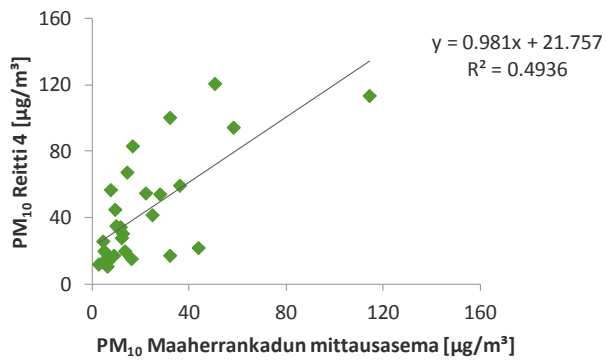
Kuva L2.4. Reitti 2:n ja Tasavallankadun mittausaseman tulokset $PM_{2.5}$ -pitoisuudelle.



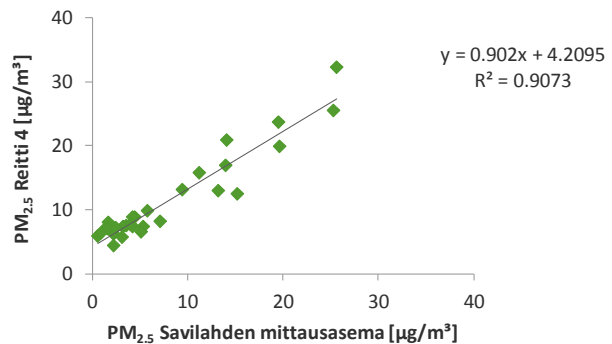
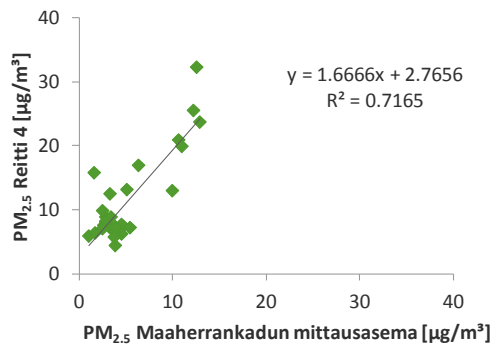
Kuva L2.5. Reitti 3:n ja Maaherrankadun mittausaseman tulokset PM_{10} -pitoisuudelle.



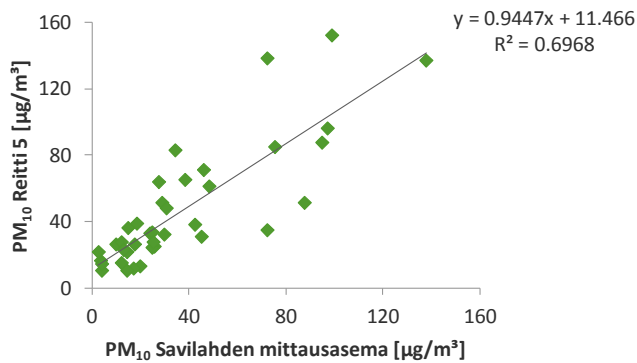
Kuva L2.6. Reitti 3:n ja Maaherrankadun mittausaseman tulokset $PM_{2.5}$ -pitoisuudelle.



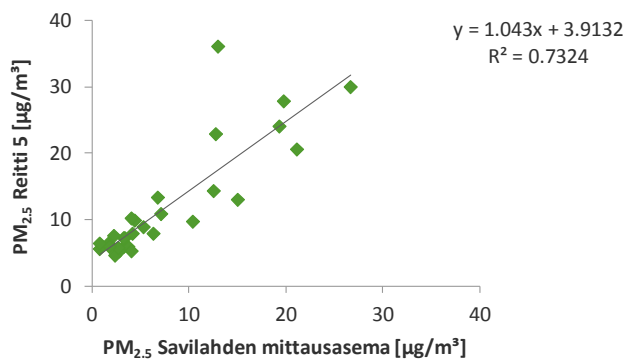
Kuva L2.7. Reitti 4:n ja Maaherrankadun sekä Savilahden mittausasemien tulokset PM_{10} -pitoisuudelle.



Kuva L2.8. Reitti 4:n ja Maaherrankadun sekä Savilahden mittausasemien tulokset $PM_{2.5}$ -pitoisuudelle.

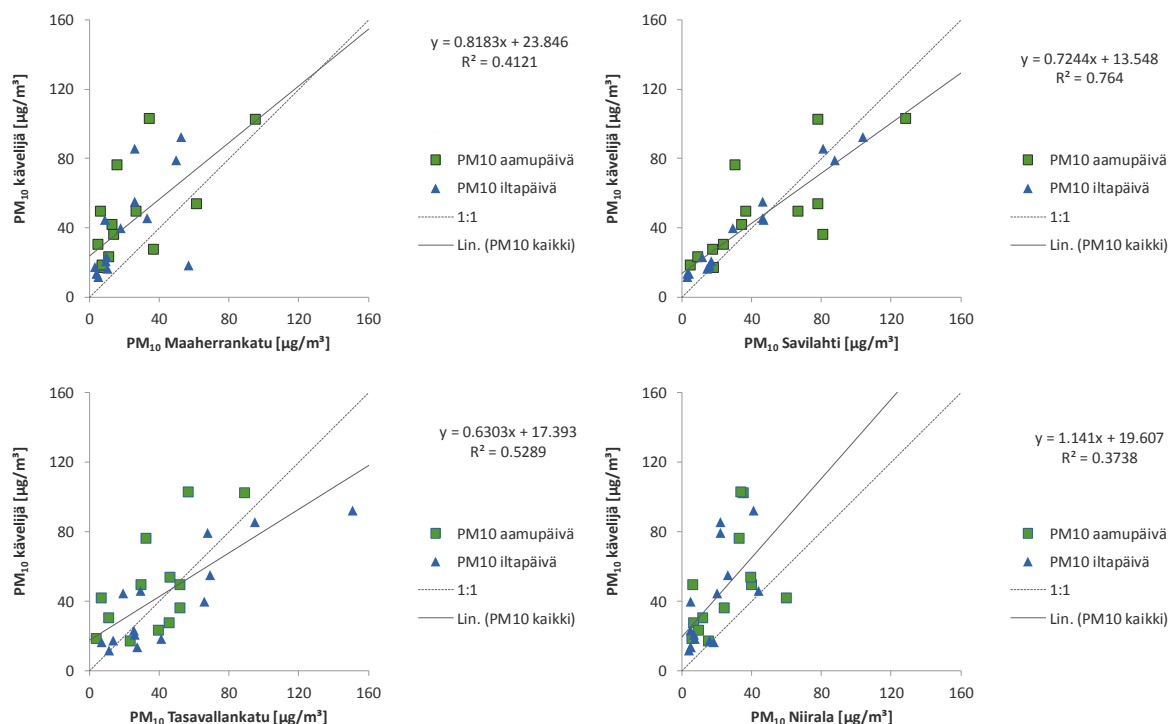


Kuva L2.9. Reitti 5:n ja Savilahden mittausaseman tulokset PM_{10} -pitoisuudelle.

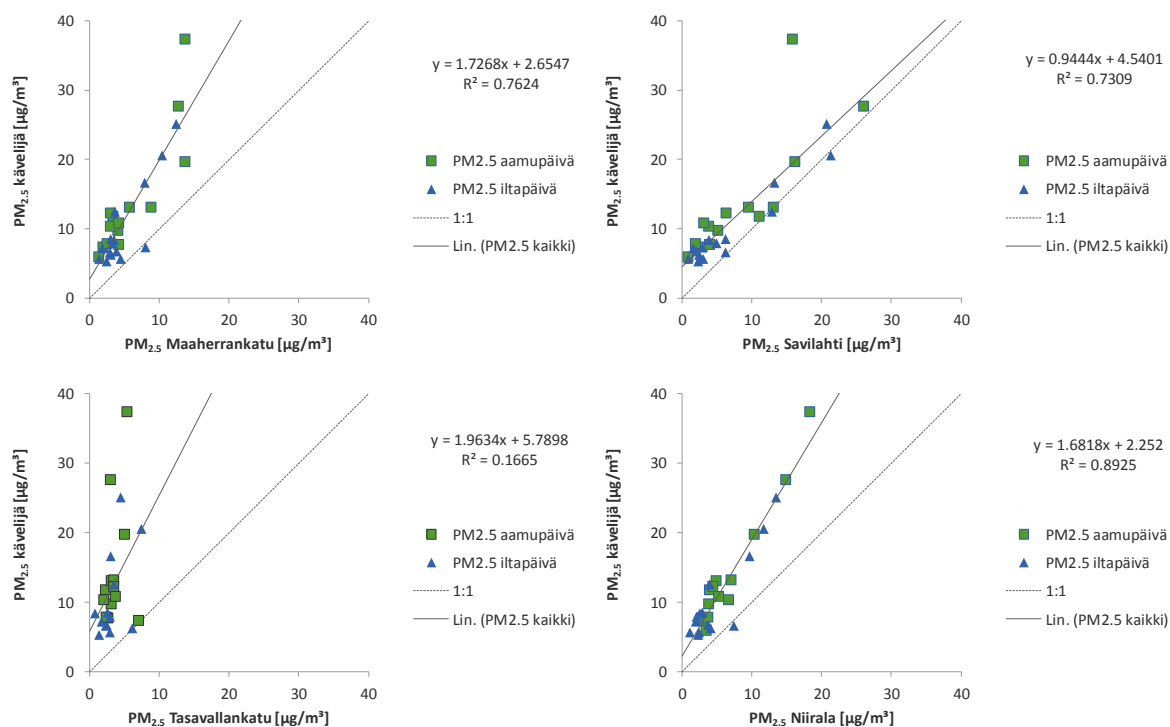


Kuva L2.10. Reitti 5:n ja Savilahden mittausaseman tulokset $PM_{2.5}$ -pitoisuudelle.

Liite 3. Kaikki reitit yhdistävä ympyräreitti verrattuna ilmanlaadun mittausasemien pitoisuuksiin



Kuva L3.1. PM₁₀-pitoisuudet verrattuna mittausasemien pitoisuuksiin, kun kaikkien osareittien mittaussaineistot on yhdistetty katupölykaudelta ja sen ulkopuolelta.



Kuva L3.2. PM_{2.5}-pitoisuudet verrattuna mittausasemien pitoisuuksiin, kun kaikkien osareittien mittaussaineistot on yhdistetty katupölykaudelta ja sen ulkopuolelta.